水稻精準農業體系

楊純明
林俊義 主編

行政院農業委員會農業試驗所

水稻精準農業體系

Rice Precision Farming System

農業委員會農業試驗所特刊編號第 105 號
ISBN 957-01-4787-3

水稻精準農業體系

楊純明
林俊義 主編

本書收錄於 2003 年 9 月 17 日假行政院農業委員會農業試驗所國際會議廳舉行之「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫成果研討會發表之論文

行政院農業委員會 農業試驗所

中華民國九十二年九月

Special Publication of TARI NO.105
ISBN 957-01-4787-3

Rice Precision Farming System

Edited by

Chwen-Ming Yang, Ph.D.
Senior Agronomist / Research Fellow
Division of Agronomy
Agricultural Research Institute
Council of Agriculture

Chien-Yih Lin, Ph.D.
Plant Pathologist
Director General
Agricultural Research Institute
Council of Agriculture

Published by

Agricultural Research Institute, Council of Agriculture

September, 2003

國家圖書館出版品預行編目資料

水稻精準農業體系/楊純明、林俊義，主編. --
初版. -- 臺中縣霧峰鄉：農委會農業試驗所,
2003[民 92]
250 面: 19*26 公分
ISBN 957-01-4787-3(精裝)
1.稻米-栽培-管理
434.117 92015346

水稻精準農業體系

發行人 / 林俊義
編者 / 楊純明　林俊義
出版者 / 行政院農業委員會農業試驗所
地址 / 臺中縣霧峰鄉 41301 萬豐村中正路 189 號
電話 / 04-2330-2301，傳　眞/04-2333-8162
網址 / http://www.tari.gov.tw
印刷廠 / 學安文化事業有限公司
臺中市南區仁和二街 78 號，電話: 04-2286-1600
出版年月 / 2003 年 9 月
版次 / 初版
展售處 / 三民書局，臺北市重慶南路一段 62 號 02-2361-7511
國家書坊台視總店，台北市八德路三段 10 號 02-2578-1515 轉 643
五南文化廣場，臺中市中山路 2 號 04-2226-0330
新進圖書廣場，彰化市光復路 177 號 04-725-2792
青年書局，高雄市青年一路 141 號 07-332-4910
售價 / 400 元
統一編號(GPN): 1009202727
ISBN: 957-01-4787-3

Agricultural Research Institute

Council of Agriculture, the Executive Yuan
189 Chung-Cheng Road
Wufeng, Taichung Hsien 41301
Taiwan, Republic of China

Tel: +886-4-2330-2301
Fax: +886-4-2333-8162
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw
Web site: www.tari.gov.tw

Copyright © 2003 Agricultural Research Institute, Council of Agriculture
All Rights Resrved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means: electronically, mechanically, by photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the copyright owner.

ISBN 957-01-4787-3
GPN 1009202727
Special Publication of TARI No.105

Printed in Taiwan, Republic of China, by Shyue-An Press, Taichung, Taiwan, ROC

目 錄

作者-- xi

序-- 林俊義 xv

前言-- 林俊義、楊純明 xvii

水稻精準農業(耕)體系之研究
-- *楊純明、林俊義* 1

由植被高解析反射光譜模式化水稻之生長
-- *楊純明、陳榮坤* *13*

由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量
-- *陳榮坤、楊純明* *25*

由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量
-- *張芳銘、楊純明* *35*

SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測
--*吳啓南、蕭國鑫、廖子毅* *43*

利用空載多波段資料推求水稻田蒸發散量之研究
-------------------------*劉說安、陳奕穎、張子瑩、徐誌豪、申雍、楊純明、吳啓南* *61*

水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術
------------------------------------ *申雍、李裕娟、章國威、羅正宗、姚銘輝、陳仁炫* *73*

應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術
------------------------------------ *申雍、吳正宗、陳仁炫、江志峰、劉禎祺、王鐘和* *81*

由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態
-- *楊純明* *89*

機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用
-- *申雍、李裕娟、章國威、姚銘輝* *97*

肥料深施及穗肥對水稻產量之效應及診斷研究
-- *王鐘和、林毓雯、丘麗蓉、陳琦玲、劉滄棽* *105*

土壤肥力診斷在水稻精準施肥管理之應用
-------------------------王鐘和、江志峰、申雍 121

精準農耕水稻施肥決策系統之案例分析
-------------------------陳琦玲、張瑞明 133

精準農業共同試驗田區農耕資料庫之建立
-------------------------劉滄棽、蔡金川、張義璋、余志儒、陳治官 145

精準農業試驗田區 2000-2002 年水稻主要病害之消長
-------------------------張義璋、謝麗娟 161

精準農業試驗田區水稻主要蟲害之監測
-------------------------余志儒 167

稻作產量分佈圖自動偵測系統-應變式穀流感測器最佳安裝位置研究
-------------------------黃國祥、盧福明、蔡致榮、梁連勝、張福祥、林連雄、林達德 175

稻株含氮量多光譜影像遙測系統之研究
-------------------------陳世銘、黃竣吉、楊智凱、陳加增、黃政偉、吳德輝、蔡養正、繆八龍 187

變率施噴系統之研發與評估
-------------------------梁連勝、陸龍虎、徐武煥、黃國祥、蔡致榮 207

GPS自動噴藥機之開發—變率施噴系統基礎研究
-------------------------葉仲基、廖盈達、梁連勝 219

水稻變率深層施肥機之研究
-------------------------謝禮丞、欒家敏、謝廣文、黃禮棟 231

精準農業之原則與實務管理—以農業試驗所水稻農場為例
-------------------------賴吉雄、楊清祥、陳邦華、陳志昇、劉嘉仁、吳惠卿、吳錫家、陳烈夫 239

名詞索引------------------------- 251

Contents

Contributors-- xi

Preface-- xv

Foreword-- xvii

Rice precision farming system
Chwen-Ming Yang and Chien-Yih Lin-- 1

Using Hyperspectral Reflectance Data to Modeling Rice Growth
Chwen-Ming Yang and Rong-Kuen Chen-- 13

Using Hyperspectral Reflectance Data to Modeling Rice Yield
Rong-Kuen Chen and Chwen-Ming Yang-- 25

Using Hyperspectral Reflectance Data to Estimate Nitrogen in Rice Plants
Fan-Ming Chang and Chwen-Ming Yang -- 35

Rice Yield Estimation Using SPOT and DUNCAN Imagery
Chi-Nan Wu, Kuo-Hsin Hsiao and Tzu-Yi Liao-- 43

Airborne Remote Sensing of Evapotranspiration over Rice Paddy
Yuei-An Liou, Yi-Ying Chen, Tzu-Yin Chang, Zui-Hao Hsu, Yuan Shen, Chwen-Ming Yang and Chi-Nan Wu -- 61

Remote Sensing Techniques to Determine Nitrogen Status of Rice plants for Precision Management
Yuan Shen, Yuh-Jyuan Lee, Kuo-Wei Chang, Jeng-Chung Lo, Ming-Hui H. Yao and Jen-Hshuan Chen--------- 73

Locating Soil Limiting Factors as Assisted by Remote Sensing Images
Yuan Shen, Jeng-Tzung Wu, Jen-Hshuan Chen, Chih-Feng Chiang, Jen-Chyi Liu and Chong-Ho Wang ----- 81

Using Chlorophyll Meter to Estimate and Monitoring Leaf Chlorophyll and Nitrogen Status in Rice Plants
Chwen-Ming Yang -- 89

Construction and Application of A Helicopter Mounted Simplified Hyperspectral Imaging System
Yuan Shen, Yuh-Jyuan Lee, Kuo-Wei Chang and Ming-Hui Yao -- 97

Response of Rice Yield to Deep Placement of Fertilizer and Nitrogen Top-dressing During Panicle Initiation Stage and Its Diagnosis
Chong-Ho Wang, Yu-Wen Lin, Li-Rong Chiu, Chi-Ling Chen and Tsang-Sen Liu ---------------------- 105

Application and Diagnosis Technique of Soil Fertility in Precision Agriculture
Chung-Ho Wang, Chih-Feng Chiang and Yuan Shen -- 121

Case Study of Fertilization Decision Support System for Precision Farming on Rice
Chi-Ling Chen and Jui-Min Chang ---------- 133

Establishment of Web Site and Collaborative Databse for Precision Agriculture
Tsang-Sen Liu, Jin-Chuan Tsai, Yih-Chang Chang, Jih-Zu Yu and Chyr Guan Chern ---------- 145

Changes in Main Diseases of Rice in Precision Farming Field at Agricultural Research Institute in 2000-2002
Yih-Chang Chang and Li-Jyuan Hsieh ---------- 161

Population Dynamics of Main Insect Pests of Rice in Precision Farming Field at Agricultural Research Institute
Jih-Zu Yu ---------- 167

Development of Automatic Agricultural Machinery for Precision Agriculture–Optimal Location of a Strain-type Grain Flow Measuring System Installed on an Oriental Rice Combine
Kuo-Hsiang, Fu-Ming Lu, Jyh-Rong Tsay, Lien-Sheng Liang, Fu-Shang Chang, Lian-Hsiung Lin and Tate Lin ---------- 175

Development of Multi-Spectral Remote Imaging System to Measure Nitrogen Content in Rice
Suming Chen, Chun-Chi Huang, Chih-Kai Yang, Cheng-Wei Huang, Te-Hui Wu, Yang-Zenq Tsai and Pa-Lung Miao ---------- 187

Development and Evaluation of a Variable Rate Spraying System
Lien-Sheng Liang, Lung-Hu Lu, Wuu-Huann Shyu, Guo-Shiang Hwang and Jyh-Rong Tsay ---------- 207

Development of a GPS-operated Sprayer–Basic Study of the Variable-rate Spraying System
Chung-Kee Yeh, Ying-Tar Liao and Lien-Sheng Liang ---------- 219

Study on A Variable Rate Fertilizing System Using Underground Application for the Paddy Field
Li-Cheng Hsieh, Jar-Miin Luan, Kung-Wen Hsieh and Li-Don Hwang ---------- 231

Principles and Practice of Rice Farming Management for Precision Agriculture at ARI
Chi-Hsiung Lai, Ching-Hsiang Yang, Bang-Hua Chen, Chih-Sheng Chen, Chia-Jen Liu, Huen-Chang Wu, His-Chia Wu and Lit-Fu Chan ---------- 239

Index ---------- 251

作者

王鐘和，行政院農業委員會農業試驗所農化組副研究員

丘麗蓉，行政院農業委員會農業試驗所農化組約用助理

申　雍，國立中興大學土壤環境科學系教授

李裕娟，行政院農業委員會農業試驗所農藝組薦任技佐

江志峰，行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

余志儒，行政院農業委員會農業試驗所應動組助理研究員

吳正宗，國立中興大學土壤環境科學系講師

吳啓南，工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室研究員

吳惠卿，行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

吳德輝，國立嘉義大學生物機電工程學系講師

黃錫家，行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

林俊義，行政院農業委員會農業試驗所所長

林連雄，國立宜蘭大學生物機電學系講師

林達德，國立臺灣大學生物產業機電工程學系教授

林毓雯，行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

姚銘輝，行政院農業委員會農業試驗所農工組副研究員

徐誌豪，國立中央大學水文科學研究所碩士生

徐武煥，行政院農業委員會農業試驗所農工組助理研究員

陸龍虎，行政院農業委員會農業試驗所農工組副研究員

陳仁炫，國立中興大學土壤環境科學系教授

陳世銘，國立臺灣大學生物產業機電工程學系教授

陳加增，國立臺灣大學生物產業機電工程學系博士生

陳邦華，行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

陳志昇，行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

陳治官，行政院農業委員會農業試驗所農藝組副研究員

陳奕穎，中央大學水文研究所助理

陳烈夫，行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

陳琦玲，行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

陳榮坤，行政院農業委員會農業試驗所農藝組助理研究員

章國威，國立中興大學土壤環境科學系博士後研究

黃峻吉，國立臺灣大學生物產業機電工程學系碩士生

黃政偉，國立臺灣大學生物產業機電工程學系碩士生

黃國祥，行政院農業委員會農業試驗所農工組助理研究員

黃禮棟， 行政院農業委員會農業試驗所農工組副研究員

梁連勝， 行政院農業委員會農業試驗所農工組研究員兼組長

張子瑩， 國立中央大學太空科學研究所博士生

張芳銘， 行政院農業委員會農業試驗所農藝組助理研究員

張愛華， 行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

張義璋， 行政院農業委員會農業試驗所植病組副研究員(已退休)

張瑞明， 行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

張福祥， 岡山農工職校生物機電科主任

楊純明， 行政院農業委員會農業試驗所農藝組研究員

楊智凱， 行政院農業委員會農業試驗所農工組助理研究員

楊清祥， 行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

葉仲基， 國立臺灣大學生物產業機電工程學系副教授

廖子毅， 工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室副研究員

廖盈達， 國立臺灣大學生物產業機電工程學系博士生

劉禎祺， 行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

劉說安， 國立中央大學太空及遙測研究中心教授

劉滄棽， 行政院農業委員會農業試驗所農化組助理研究員

劉嘉仁， 行政院農業委員會農業試驗所農場組助理研究員

蔡金川， 行政院農業委員會農業試驗所農工組副研究員(已退休)

蔡致榮， 行政院農業委員會農業試驗所農工組副研究員

蔡養正， 國立臺灣大學農藝學系教授(已退休)

盧福明， 國立臺灣大學生物產業機電工程學系教授

蕭國鑫， 工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室研究員

賴吉雄， 行政院農業委員會農業試驗所農工組研究員兼組長

謝廣文， 國立中興大學生物產業機電工程學系副教授

謝禮丞， 國立中興大學生物產業機電工程學系副教授

謝麗娟， 行政院農業委員會農業試驗所植病組技佐

繆八龍， 國立臺灣大學農業試驗場組長

羅正宗， 行政院農業委員會農業試驗所嘉義分所農藝系助理研究員

欒家敏， 國立中興大學生物產業機電工程學系教授(已退休)

Contributors

Lit-Fu Chan, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Ay-Hwa Chang, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Insitute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Fan-Ming Chang, Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Fu-Shang Chang, Department of Bio-Electronics, National Kang-San Vocational School, Kang-San, Kaohsiung Hsien 820, Taiwan, ROC

Jui-Min Chang, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Kuo-Wei Chang, Department of Solid Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Tzu-Yin Chang, Institute of Space Sciences, National Central University, Chungli 320, Taiwan, ROC

Yih-Chang Chang, Division of Plant Pathology, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Bang-Hua Chen, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Chia-Tseng Chen, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Chih-Sheng Chen, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Chi-Ling Chen, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Jen-Hshuan Chen, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Rong-Kuen Chen, Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Suming Chen, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Yi-Ying Chen, Institute of Hydrological Sciences, National Central University, Chungli 320, Taiwan, ROC

Chyr-Guan Chern, Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Chih-Feng Chiang, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Li-Rong Chiu, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Kuo-Hsin Hsiao, Geospacial Information Technology Lab., Energy & Resources Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu 310, Taiwan, ROC

Kuang-Wen Hsieh, Department of Bio-Industrial Mechatronics, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Li-Cheng Hsieh, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Li-Jyuan Hsieh, Division of Plant Pathology, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Zui-Hao Hsu, Institute of Hydrological Sciences, National Central University, Chungli 320, Taiwan, ROC

Cheng-Wei Huang, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Chun-Chi Huang, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Li-Duhng Huarng, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Kuo-Hsiang Hwang, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Chi-Hsiung Lai, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Yuh-Jyuan Lee, Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Lien-Sheng Liang, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Tzu-Yi Liao, Geospacial Information Technology Lab., Energy & Resources Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu 310, Taiwan, ROC

Ying-Tar Liao, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Chien-Yih Lin, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Lian-Hsiung Lin, Department of Bio-Mechatronics, National I-Lan University, I-Lan260, Taiwan, ROC

Tate Lin, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Yu-Wen Lin, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Yuei-An Liou, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University, Chung-Li 320, Taiwan, ROC

Chia-Jen Liu, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Jen-Chyi Liu, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Tsang-Sen Liu, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Jeng-Chung Lo, Department of Agronomy, Chiayi Branch Station, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Chiayi 600, Taiwan, ROC

Fu-Ming Lu, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Lung-Hu Lu, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Jar-Minn Luan, Department of Biomechatronic Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Pa-Lung Miao, The Experimental Farm, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Yuan Shen, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Wuu-Huann Shyu, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Jin-Chuan Tsai, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wifeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Yang-Zenq Tsai, Department. of Agronomy, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Jyh-Rong Tsay, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Chong-Ho Wang, Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Chi-Nan Wu, Geospacial Information Technology Lab., Energy & Resources Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu 310, Taiwan, ROC

His-Chia Wu, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Huen-Chang Wu, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Jeng-Tzung Wu, Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

Te-Hui Wu, Department of Biomechatronic Engineering, National Chia-Yi University, Chia-Yi 600, Taiwan, ROC

Chih-Kai Yang, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Ching-Hsiang Yang, Division of Farm Management, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Chwen-Ming Yang, Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

Ming-Hui Yao, Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan, ROC

Chung-Kee Yeh, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, ROC

Jih-Zu Yu, Division of Applied Zoology, Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Wufeng, Taichung Hsien 413, Taiwan, ROC

序

「精準農業(precision agriculture, PA)」似乎是一個近二、三十年前才出現的新名詞，但是它的緣起與內涵卻是人類文明歷經千百年漫長歲月的摸索才孕育總結出來，期以解決當前農業面臨的生產困境。眾所周知在工商產業負面的推波助瀾下，農業生產過程衍生的農藥與肥料殘留、水質污染、土質劣化及溫室效應氣體釋放等環境問題，已漸不利於農作物未來的持續生產。二十世紀末隨著環保意識的顯著抬頭，加上資訊與技術的皆臻完備及對知識經濟的重視，精準農業理念和實務作業因運而起，並順勢成爲農業科學中近年來成長快速的一門專業領域。不斷的有人提出新的構想、假說及觀點，同時也有不同於以往的成果、產品及作業系統逐一問世，給二十一世紀的農業帶來清新而有活力的氣息和願景，並將漸漸成爲農業的主流。相較於「生物技術」的偏物化傾向及單純技術層面，「精準農業」融合了科學技術、人文思想和實務操作，在引導農業朝向高科技及高效能時代邁進的同時，也追求農業永續和天人合一的理想境界。

精準農業發展的初期，多是以農作物栽培爲主要目標，著重於農作物耕作及土壤肥力的管理，因著不同情境與歷程分別被稱精準農耕(precision farming, PF)、處方式農耕(prescription farming)、特定地點(區)農耕(site-specific farming)、變異率技術(variable-rate technology)、變異率操作系統(variable-rate operating system)等等。近年更因爲強調生態環境的重點，採用低投入標準以謀求農地的永續使用，而又稱爲永續農地使用的低投入農耕(sustainable-land-use low-input farming)。如今實施精準農業的農作物，已由穀類、纖維等作物延廣至果樹、蔬菜、花卉及其他特用作物等不同類別，精準經營管理的項目也擴增到作物營養狀態、病蟲害危害、產量估測與預測、水分管理、災害評估及物種辨識等多元面向和多樣目的，栽培地點甚且從田間移入室內(如溫室、網室或簡易設施)，管理面積亦彈性的從數百平方公尺展延至數千公頃不等。簡明扼要說，精準農業要求能夠掌握氣候(象)及土壤環境的時間與空間變異，縮短預期與實際變異的差距，評估栽培管理的效應，以及其對農作物生育的影響，使能經由人爲手段進行高效率和高效能的經營與管理，並減少由操作過程所產生的非點源污染(non-point source pollution)，達到穩定生產質量、創造生產利潤及保護生態環境的目標，進而獲得農業的永續發展。

經過世界各地近二、三十年來蓬勃發展的結果，「精準農業」已不單是一種理念，一樣做法，也是一套套農業經營管理體系，更成爲活潑而具有彈性的多面向農業制度與情境，隨著各特定目標開發出不同『產品』。在農作物精準管理上的成功，促使精準農業實施對象由狹義的農業延伸至林業、漁業、畜牧業等廣義的農業產業範疇，出現了所謂的「精準林業」、「精準漁業」、「精準畜牧業」等新興名詞，追求達到標的物、人力及資源(材)等多元的合理化綜合經營

管理。目前舉凡設立特定目標的農業產業項目，均可本著『過猶不及』、『圓融則通』的「差異管理原則」擬定一套精準農業做法，依照各式各樣的特定項目擬訂特定目標。由於精準農業融合各種知識、傳統技藝，加入了現代化科技和創新做法，並連接起符合現代化人本精神的溫馨介面，因而使得農業獲得蛻變式的完全更新，將一躍成爲農業脈動的主流。預料提升至精準農業層次的農業產業，必然帶動生產與管理技術的全面升級，並引領農業邁向高效率及高效能時代，而帶給農業新的氣象和新的風貌。難能可貴的是精準農業的『天人合一』理想，帶入環保思維於操作農業的流程，化解『生產』與『環保』的對立，使得經濟與環保維持最佳動態平衡，也使得『農業永續』化口號成爲具體可行前景。

行政院農業委員會於 1999 年 12 月成立「水稻精準農業(耕)體系之研究」專案科技計畫，站在先驅性試驗研究立場致力於研發精準農業體系所需之關鍵知識、技術、組(元)件及系統芻型。農委會農業試驗所自 2001 年起承辦後，邀集國內相關領域專業人才全力執行計畫，並在計畫期限的最後一年舉辦成果研討會暨展示會。本書爲計畫成果報告彙輯，提供各界檢視和參考，期盼有助於精準農業在國內的深根與發展。

林俊義

農業委員會農業試驗所所長

2003 年 9 月

前 言

本書收錄於民國九十二年九月十七日假行政院農業委員會農業試驗所國際會議廳舉行之「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫成果研討會發表之論文，依照標準格式彙編成冊。全書計有二十二篇，分由參與執行計畫的專家學者撰寫，將各項目的研究成果簡要說明與介紹。因此，本書內容涵蓋水稻精準農業體系有關的知識與技術，也包含以推廣爲主要目的針對計畫研發結果的概述，因此同時適合專業人士和一般民眾閱讀。

第一篇報告『水稻精準農業體系之研究』，論及精準農業的緣起、內涵、發展與願景，也將國內、外的精準農業研發現況簡略敘述。文中另介紹先驅性試驗研究計畫「水稻精準農業(耕)體系之研究」的執行成果，檢討計畫得失，可藉以全窺本書的精華。第二篇報告『由植被高解析反射光譜模式化水稻之生長』，旨在探討近地面量測之水稻植被高解析反射光譜之季節變化，並利用不同方法來篩檢估測水稻生長的光譜特徵，建立光譜遙測模式。第三篇報告『由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量』，以不等氮肥施用量處理來建構不同植被狀態及產量表現之水稻族群，用以探討標準差植被指數(normalized difference vegetation index, NDVI；或稱正規差植生指數)、葉面積指數(leaf area index, LAI)及產量間的關係，達到利用植被高解析反射光譜模式化水稻產量目的。第四篇報告『由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量』，由不等量氮肥的施用所改變的水稻植被光譜曲線、稻株葉片及稈的含氮量百分比於生育期間變化的資料，篩檢出與稻株氮素含量相關性最高的光譜特徵波段。又由光譜指數及光譜特徵的分析與比較，找出適用的光譜指數及光譜特徵。再藉由多元線性複迴歸分析，選取適當的光譜特徵波段及數目，建立複迴歸模式來增進對稻株氮素狀態的估測準確度。

第五篇報告『SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測』，分別利用 SPOT 影像及 Duncan 多光譜資料的 NDVI、RVI 及 TVI 植生(被)指數，結合試驗田區坪割產量，以逐步迴歸分析向後消去法建立統計迴歸模式，推導出預估水稻產量的方程式。第六篇報告『利用空載多波段資料推求水稻田蒸發散量之研究』，利用空載高解析度可見光與熱紅外光多波段資料，配合地面氣象站所量測得的氣象資料，針對農試所的試驗田區進行蒸發散量估計，研究證實透過多波段遙測資料推估潛熱通量及可感熱通量是可行的方法，更爲水文循環提供了良好的蒸發散量空間資訊。第七篇報告『水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術』，利用遙感探測技術提供田間稻株氮營養狀況的空間分佈資訊，首先確認 $dR/d\lambda|_{735}$ 可以分辨稻株體內氮素濃度及區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力，進而利用 $dR/d\lambda|_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於臺北、臺中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證。第八篇報告『應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術』，探討應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之方法，

並針對所分析之研究區域，提出可增加水稻產量之精準農耕操作方法的建議。

第九篇報告『由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態』，調查水稻生育期間稻株葉片葉綠素及氮素含量，配合以葉綠素計讀值的量測，建立葉綠素計讀值與葉綠素及氮素之關係式，利用於估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態。第十篇報告『機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用』，設法將自行開發之簡易高光譜影像拍攝系統裝設於直昇機上，建立具有高機動性和高解析度的機載高光譜遙測系統，提供作爲精準農業相關研究的遙測工具，遠較以人爲方式於地面進行採樣、分析的調查方式來得經濟有效，且具有整體的空間觀念。第十一篇報告『肥料深施及穗肥對水稻產量之效應及診斷研究』，探究肥料深施及穗(氮)肥施用對水稻生育的影響及穗(氮)肥施用必需性判定之基準，又發現幼穗形成期葉片葉綠素計測值與全株氮含量呈極顯著正相關，可供此時期現場診斷植株氮營養推薦穗(氮)肥用量之依據。第十二篇報告『土壤肥力診斷在水稻精準施肥管理之應用』，依據現行水田土壤肥力診斷推薦施肥技術，設置氮、磷、鉀肥不同用量處理，並設置氮肥高量及磷鉀肥足量施用之農家慣用量區爲對照，探討不同肥料用量處理水稻各生育時期、階段之乾物累積及要素吸收量之變化及產量之差異。第十三篇報告『精準農耕水稻施肥決策系統之案例分析』，針對農委會農業試驗所之精準農耕研究計畫在農試所設的試驗田區(共 10.83 公頃，分爲 163 個網格小區)，以水稻施肥決策系統，進行施肥決策分析。第十四篇報告『精準農業共同試驗田區農耕資料庫之建立』，將土壤及植體之採樣分析資料，以地理資訊系統整合並經地理統計推估空間變異，分別建立各項空間資料庫。第十五篇報告『精準農業試驗田區 2000-2002 年水稻主要病害之消長』，配合農委會農業試驗所精準農業計畫執行，調查精準農業農場之田間病害發生狀況，提供建立計畫之基礎資料庫及精準農場栽培管理之參考。第十六篇報告『精準農業試驗田區水稻主要蟲害之監測』，爲配合精準農業遙測分析之需求，進行地面實際之蟲害發生種類與數量消長調查，期能與遙測資料相呼應。

第十七篇報告『稻作產量分佈圖自動偵測系統-應變式穀流感測器最佳安裝位置研究』，測試應變式穀流感測器應用於東方式水稻聯合收穫機之最佳安裝位置，試驗使用之穀流感測器及相關組件爲 Ag Leader PF-3000 型產量監測器系統，並以日本 YANMAR GC85 型聯合收穫機脫穀處理系統之正廠零件組裝穀流感測試驗架。第十八篇報告『稻株含氮量多光譜影像遙測系統之研究』，以多光譜影像遙測技術爲基礎，自行開發出稻株含氮量多光譜影像遙測系統，能夠以非接觸、非破壞方式擷取水稻之多光譜影像，並藉由自行開發之軟體進行分析及輸出水稻田區之含氮量分佈圖，提供施肥的依據。第十九篇報告『變率施噴系統之研發與評估』，敘明以專家決策系統事先編製地圖爲基礎之變率施噴系統研發過程，而爲適應臺灣稻田之空間變異，使用 Mid-Tech 公司 TASC 6200 主控器之流量控制噴霧系統當主要架構，以執行一般的自動噴霧功能。第二十篇報告『GPS 自動噴藥機之開放—變率施噴系統基礎研究』，說明以農用桿式噴藥車爲研究對象，於該噴藥車上架設全球定位系統接收儀，以便即時獲取噴藥車在田區的空間

座標，並於噴藥車的施噴系統加入比例式流量控制閥，可以運用在多變的作業環境上。第二十一篇報告『水稻變率深層施肥機之研究』，介紹利用水稻插秧機做變率施肥之主體，同時採用深層施肥之方式，以發展依土壤肥力做定點變率深層施肥之農機具。第二十二篇報告『精準農業之原則與實務管理—以農業試驗所水稻農場爲例』，本文顯示 2000-2002 年之三年六期作田間產量資料，並說明目前的農耕管理作業符合精準農業之需求，可供各方來年規劃進一步試驗研究之參考。

本計畫得以順利執行完成，均賴全體研究人員的積極參與，貢獻個人的專業於試驗研究。農業試驗所農場組對於共同試驗田區的完善規劃與管理，各位細部計畫主持人對執行計畫的盡心盡力，尤其功不可沒。農委會農糧處農產科徐滄淇技正的協調與行政支援，讓研究人員沒有經費斷炊的後顧之憂。特別要感謝計畫的四位靈魂人物，監測系統召集人申雍教授、決策系統召集人劉滄棽博士、農機系統召集人盧福明教授和計畫聯絡人兼執行秘書楊純明研究員，沒有他們的全心投入及對執行計畫的使命感，本項計畫將難以圓滿的推動。計畫統籌人林俊義所長在計畫期間的領導與監督，先後擔任副統籌人的前農業試驗所劉大江副所長、農委會農糧處陳文德副處長、農產科廖進芳科長的細心輔導與關懷，提供了執行計畫源源不絕的動能。本書付梓之前，謹此對這些努力從事而又盡責體貼的好夥伴表示由衷謝忱，成果是個人的，成功是大家的。

林俊義
行政院農業委員會農業試驗所

楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組

水稻精準農業體系
水稻精準農業體系之研究
1-12, 2003

水稻精準農業體系之研究

楊純明[*1]、林俊義[2]
[1]行政院農業委員會農業試驗所農藝組
[2]行政院農業委員會農業試驗所
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 1

一、精準農業的緣起與內涵 ---------- 1

二、精準農業的發展與願景 ---------- 3

三、國際精準農業的研究發展 ---------- 4

四、國內精準農業的研究發展 ---------- 6

五、「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫介紹 ---------- 7

六、「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫之執行檢討 ---------- 10

七、結語 ---------- 11

八、誌謝 ---------- 11

九、引用文獻 ---------- 11

ABSTRACT ---------- 12

水稻精準農業體系之研究

楊純明*[1]、林俊義[2]
[1]行政院農業委員會農業試驗所農藝組
[2]行政院農業委員會農業試驗所
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要

從先驅性試驗研究計畫的角度來看，「水稻精準農業(耕)體系之研究」科技計畫的執行是相當成功的。「精準農業」一詞已普植於國內學術研究人員腦中，無論在監測系統、決策系統及農機系統的研究上，大多數的研究項目已達到計畫原先所設定的目標。在學術與推廣方面，在計畫執行期間舉辦了四次中大型研討會/展示會，讓各界人士瞭解農業的最新發展，認識新科技在農業上的深耕與開花結果，並因此學習「精準農業」有關的知識、技術、組件與系統。而三本專書的出版，除了呈現執行計畫的成果外，更延廣了執行計畫的教育成效。參與本計畫的研究人員，在計畫執行期間也先後將研究成果發表於國內外刊物中，期刊論文、研討會論文及其他推廣性報告已超過 80 篇以上，同時提供同儕檢驗及藉以激發新創意。但是，由於「精準農業」在國內仍屬新興科研項目，第一階段的四年研究計畫中較為欠缺系統的整合及操作系統獲得的經濟效益評估，因此難以評估國內發展精準農業的遠景。在無法展示「精準農業」成效的前提下，農政主管部門將無以深入瞭解研發及執行精準農業可能遭遇的問題，導致其關心和支持程度也就相對減弱。展望未來前景，倘若農政部門持續支持「精準農業」的試驗研究，建議第二階段的研究計畫當著力於特定目標系統的整合及特定目標精準農業系統效益驗證與操作展示等工作。如此，不但可以在既有的基礎上設定實務研究主題，也務實的開發出解決特定目標的精準管理操作系統，將研究主題的成果落實成為「精準農業」的成功案例。

關鍵詞： 水稻精準農業體系、精準農業、精準農耕。

一、精準農業的緣起與內涵

人類文明歷經千百年漫長時間的摸索，在實際耕作過程中流血流汗的體會，遂能持續推陳出新的經驗、知識與技術，造就現行的農耕操作體系。此一卓越成就固然因而創造出『綠色奇蹟』，大幅提升了農田的生產力，提供了配合人口增長所需要的糧食，卻也不可諱言的在工商產業的負面推波助瀾下衍生諸多環保問題，如農藥與肥料的殘留、水質的污染、土質的劣化、溫室效應氣體的釋放等。長期環境的污染與生態的破壞，讓地球村全體生物的生存空間趨於不利，也使得人類的生活品質亮起

警訊紅燈。「精準農業(precision agriculture, PA)」正是針對解決當前農業面臨的生產困境而起源與發展，並順勢成爲農業科學中近年來成長快速的一門專業領域，不斷的有人提出新的構想、假說及觀點，同時也有不同於以往的成果、產品及作業系統問世，給二十一世紀的農業帶來清新而有活力的氣息和願景，並漸漸成爲農業的主流。相較於「生物技術」的偏物化傾向及單純的技術層面，「精準農業」更是融合了科學技術、人文思想和實務操作，在引導農業朝向高科技及高效能時代邁進的同時，也追求農業永續和天人合一的理想境界。

精準農業發展的初期，多是以農場的農作物栽培爲主要目標，著重於農作物耕作及土壤肥力的管理，常稱爲精準農耕(precision farming, PF)。由於農田環境的時空變化，廣大農田各地區或各地點的農作物與農地具有極大變異，管理的重點在於鑑別及調和農田各網格地區(點)的差異，給予農作物或農地相匹配的投入、處理，故又稱爲特定地點(區)農耕(site-specific farming)。爲了調和農田各網格地點的差異，避免多餘的資源浪費及對環境的負向衝擊，乃採取低投入原則以求永續農地的耕作，而被稱爲永續農地使用的低投入農耕(sustainable-land-use low-input farming)。並研發出變異率作業機具執行田間差異性的操作，於是有變異率噴藥機具、變異率施肥機具、變異率噴施機具等的問世，因此也稱爲變異率技術(variable-rate technology)或變異率操作系統(variable-rate operating system)。爲了刈取農田各網格點的產量取得產量空間變異分佈圖，以分析造成產量變異的因素，因而開發出產量偵測追蹤機具(yield monitor)，附掛予視訊與製圖機組以描繪變異分佈圖。爲了定位農田各網格點，採用全球定位系統(global positioning system, GPS)，再爲了縮小定位差距而改裝差分全球定位系統(differential global positioning system, dGPS)。針對廣大農田的觀測與監測，則利用了不同大氣尺度平台及功能的遙測技術(remote sensing technology, RS)，如可見光影像(visible image)遙測、可見光至中紅外光範圍的光譜遙測(spectral remote sensing)、遠(熱)紅外光(thermal infrared)遙測、微波雷達(microwave radar) 遙測等，擷取出特定資訊。而爲了處理各種相關的龐大資料及現況資訊，應用了統計(statistics)與資訊科技(information technology)軟硬體，建立了各樣的資料庫(database)，套疊於地理資訊系統(geographic information system, GIS)中。同時組合不同的資料庫及模式(組)，發展出各種專家決策支援系統(decision support system)，以因應情境的變化做出對應的判斷與操作決策。

據此，點明了精準農業的豐富內函，以及其多元的面向和多樣的目的。簡單扼要的說，精準農業要求能夠精確掌握田間氣候和土壤環境的時間與空間變異，農作物預期與實際變異的差距，評估栽培管理的效應以及其對農作物生育的影響，使能經由人爲手段進行高效率與高效能的經營與管理，並減少由操作過程所產生的非點源污染(non-point source pollution)，達到穩定生產質量、創造生產利潤及保護生態環境的目標，進而永續農業的發展。

二、精準農業的發展與願景

有關於精準農業一連串的發展過程，都是爲了配合不同情境下的不等需求而孕育產生，也因此開發出各種因應的技術、組件、儀器設備和作業系統，俾『因事因時因地』的解決問題。所以，經過世界各地近二、三十年來蓬勃發展的結果，「精準農業」已不單是一種理念，一樣做法，也是一套套農業經營管理體系，更成爲活潑而具有彈性的多面向農業制度

與情境，隨著各特定目標開發出不同『產品』。其歷程由最早基於維護生產環境及降低生產成本的考量開始，歸納出如何減少資材投入以降低非點源污染，繼而謀求調和農田在時間、空間及預期上的差異來『精準』的管理農地與農作物，再進一步追求環保與經濟的雙贏及作業系統的親切易行。早期實施精準農業做法的農作物多以大面積栽培的穀類、糧食、纖維等作物爲主，再逐漸的延廣至果樹、蔬菜、花卉及其他特用作物等不同類別。此外，進行精準經營管理的項目也不斷擴增，從土壤肥力、作物營養狀態、病蟲害危害乃至於產量估測與預測、水分管理、災害評估及物種辨識等，而栽培地點甚且從田間移入室內，在溫室、網室或簡易設施內實施對農作物的精準管理，管理面積亦彈性的從數百平方公尺展延至數千公頃不等。

在農作物精準管理上的成功，促使精準農業實施對象由狹義的農業延伸至林業、漁業、畜牧業等廣義的農業產業範疇，以求達到標的物、人力及資源(材)等多元的合理化綜合經營管理。如今談「精準農業」已是海闊天空，其內容擴及農、林、漁、牧，而出現了所謂的「精準林業」、「精準漁業」、「精準畜牧業」等新興名詞，並依照目標再細分爲各式各樣的特定項目。目前舉凡設立特定目標的農業產業項目，均可本著『過猶不及』、『圓融則通』的「差異管理原則」擬定一套精準農業做法，藉由人爲的精準經營與管理達成減少非必要資源浪費、保護生態環境及提升產品質量等各種目的。

由於精準農業融合多元的知識、技術與硬體組件於農業生產和管理，同時承續了傳統的技藝，加入了現代化科技和創新做法，並連接起符合現代化人本精神的溫馨介面。如此一來，將使得農業獲得蛻變式的完全更新，不再是封閉落後的事業，一躍成爲農業脈動的主流，更脫離了弱勢產業的刻板印象。預料提升至精準農業層次的農業產業，必然帶動生產與管理技術的全面升級，並引領農業邁向高效率及高效能時代，而帶給農業新的氣象和新的風貌。更難能可貴的，精準農業的『天人合一』理想帶入環保思維於操作農業的流程，將可澈底改變農業從業人員的觀念，更新舊有的僵化體制，化解『生產』與『環保』的對立，正面的改進農業生產系統，使得經濟與環保維持最佳動態平衡，也使得『農業永續』化口號成爲具體可行。

三、國際精準農業的研究發展

綜觀世界各地執行精準農業的現況，項目可謂是五花八門，卻也顯示出世界各地依照不同的農業需求而有多樣的特定目標，而由研究成果帶動的產業革新風潮更是百家齊放。美、歐、澳、加、日等先進國家的許多高等學府和試驗研究機構內，已設立「精準農業」有關的研究開發專責單位，積極從事各種試驗研究、系統整合及教育推廣等工作。在研究發展方面，各地均本著其獨特的農業情境進行廣泛的研究，研發適用當地的技術、感測機具與設備及作業系統。欲全窺現階段國際精準農業的發展狀況及趨勢，可由召開的大型國際性會議擷獲全貌，其中尤以國際精準農業會議(International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management)及歐洲精準農業會議(European Conference on Precision Agriculture)二項最具代表性，前者由美國明尼蘇達大學精準農業中心(Precision Agriculture Center, University of Minnesota, USA)舉辦(已辦理六屆)，後者由歐洲各國相關機構輪流承辦(已辦理四屆)。兩者有默契的採隔年交叉方式辦理，容納來自世界各地的學者專家、農民、農政官員、廠商、產

業界等不同人士匯集一堂，交換知識、技術、經驗、實務心得與政策方向，並觀摩軟硬體及操作系統的最新發展。

根據2002年在美國明尼蘇達州明尼亞波里市召開的第六屆國際精準農業會議(the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management)的分門別類，總計區劃成: (1)遙測科技在精準農業的應用(applications of remote sensing to precision agriculture)、(2)自然資源變異的探討(natural resources variability)、(3)實施精準農業有關的技術與感測器(technology and sensors)、(4)遙感探測與氮素管理(remote sensing and nitrogen management)、(5)遙感探測與病蟲害管理(remote sensing and pest management)、(6)統計及地理統計(statistics and geostatistics)、(7)自然資源變異及電導度的應用(natural resources variability and electrical conductivity)、(8)取樣技術(sampling)、(9)模式分析(modeling)、(10)收益及氮素(profitability/nitrogen)、(11)收益及產量(profitability/yield)、(12)技術系統及導引系統(technology and guidance systems)、(13)技術及產量(technology/yield)、(14)精準農業在世界各地的最新應用(new applications from around the world)、(15)技術轉移與課程(technology transfer and curriculum)、(16)技術推廣(technology outreach)、(17)作物品質(crop quality)、(18)精準農業管理系統(precision agriculture management system)、(19)資訊管理(information management)、及(20)環境(environment)等 20 大方向(Precision Agriculture Center, 2002)，說明了精準農業相互關聯領域的複雜與世界各地研究發展的多樣。

2003 年在德國柏林召開的第四屆歐洲精準農業會議(the 4th European Conference on Precision Agriculture)，則將全球精準農業的發展現況予以歸類爲 16 大類，包括:(1)針對農作物營養狀態動態追蹤、能量循環及產量資訊的精準管理系統(yield information, nutrient dynamics and energy flow in precision agriculture)、(2)精準農業的模式與系統化研究(systems research and modeling in precision agriculture)、(3)精準農業決策支援系統所需感測儀器設備的研發與應用(sensors and their applications for decision support in precision agriculture)、(4)分析農地及作物生產空間變異的方法及套裝工具(methods and tools to analyze spatial variability in crop production—soil and site)、(5)開發中國家的精準農業(Precision agriculture in developing countries)、(6)精準農業對社會層面的影響(Social aspects of precision agriculture)、(7)精準農業的決策支援系統(Decision support tools for precision agriculture)、(8)精準農業的教育、推廣及訓練(Teaching, extension and training for precision agriculture)、(9)精準農業的技術層面(Technical aspects of precision agriculture)、(10)實施精準農業對經濟及作物生產經營管理的可能衝擊(Impact of precision agriculture on economy and management of crop production)、(11)農田及農場的資訊管理(Information management in the field and on the farm level)、(12)實施精準農業對農地及環境的長期影響(Long term effects of precision agriculture on site and environment)、(13)精準農業的研究規劃、資料分析及統計(Statistics, data analysis and research design for precision agriculture)、(14)精準農業的農作物管理決策(Crop management strategies in precision agriculture)、(15)農作物及其植被的空間變異分析方法及套裝工具(Methods and tools to analyze spatial variability in crop production-canopy and plants)、及(16)利用於農作物生產空間變異分析方法及套裝工具的新

式感測器(Methods and tools to analyze spatial variability in crop production-new sensors) (Stafford. and Werner, 2003)，進一步顯示出精準農業涵蓋面向的多元及隨著時空情境改變的演進，值得各方參考。

尤有甚之，「精準畜牧業」經過近十餘年來的大力推展，目前也獲得相當輝煌的研究成果。以 2003 年 6 月在德國柏林召開的第一屆歐洲精準畜牧業會議(the 1st European Conference on Precision Livestock Farming)為例，已將正在積極研發的零零種種項目分類為 6 大項，包括(1)辨識廣大牧場畜養動物的遙測技術(new technologies for individual identification of farm animals)、(2)畜牧場的模式化與系統化精準管理研究(systems research and modeling in precision livestock farming)、(3)經營優良畜產品處理與管控流程的決策支援套裝工具(decision support tools for process and product quality chain management)、(4)提供畜養動物餵食控制、健康管理與繁殖生產等決策支援系統所需的感測器及其應用(sensors and their application for decision support in animal feeding, health management and reproduction)、(5)畜養動物泌乳處理之感測器及其應用(sensors and their application for decision support in milking processes)、以及(6)畜養動物健康管理感測與追蹤(telemetric measurement and monitoring of animal welfare parameters) (Agrartechnik Bornim, 2003)，顯示「精準畜牧業」在世界各地普遍受到的重視，特別是畜牧業發達的農政部門和產業機構，多已進行有組織及有系統的試驗研究和實務操作。

四、國內精準農業的研究發展

行政院農業委員會為順應此一世界性農業發展潮流，特於 1997 年研擬「我國精準農業發展方向與策略」作為規劃國內精準農業試驗研究的準則，1998 年委託臺灣大學農學院進行初步評估，並於 1999 年 12 月以前瞻性的眼光正式成立「水稻精準農業(耕)體系之研究」專案科技計畫(楊及林，2000)，再於 2001 年起將此一先驅性試驗研究計畫委由農委會農業試驗所統籌規劃與辦理。此一統籌型科技計畫在農業試驗所區劃出近 10 公頃的試驗農場，選擇栽植面積及產值均居臺灣地區糧食作物首位的水稻為參試作物，邀集國內各有關專業領域的學者專家共同參與，致力於研發適合臺灣地區水稻栽培的精準農耕體系關鍵技術與軟硬體組件，獲取必要的知識及建立相關的資料庫。本項計畫預定於 2003 年底告一段落，也已分別於 2002 年 10 月及 2003 年 9 月中展示及發表其試驗研究成果。而經過該研究團隊 4 年來的辛勤努力及積極推展，已順利的將「精準農業」理念普植於農業研究人員腦海之中，並獲得相當豐碩的研究成果。目前，國內已另有多個研究單位組成研究團隊，進行包括蔬菜、花卉、牧草等的精準管理研究，將國內精準農業的發展從啓萌期推向令人激勵鼓舞的成長階段。

「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫規劃成三大研究系統(楊及林，2002)，即「水稻生育狀態與環境監測系統」、「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」、及「精準農業自動化農機操作系統」，分別以協力整合方式進行研發工作。依據本項計畫的分工，監測系統扮演相當於人體“眼睛”的角色，檢(偵)測與追蹤田間水稻外觀生長性狀與土壤特性的空間變異，提供現況資訊給類同人體“大腦”的決策系統做出判斷與對應的網格決策圖，再由擔任人體“四肢”的農機具系統據以實施差異性而合理有效的操作，完成對標的物件的精準管理程序。

在此項先驅性科技計畫中，「水稻生育狀況與環境監測系統」強調關鍵技術的研發及栽培問題的解決方案，研擬提供田間水稻生育、氮營養、病蟲害、產量、土壤性質及肥力狀態之空間變異分佈圖的遙測技術，於是擬訂(1)水稻生長、逆境及產量之監測與估測技術與應用、(2)稻株氮營養狀況偵測技術與應用、(3)水稻光譜資料庫建置與應用研究及(4)土壤性質及肥力狀態偵測技術與應用等四個子題。「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」首先考量肥料的管理及資料庫的建立，規劃出(1)水稻精準施肥決策專家系統之建立及(2)精準農耕綜合資料庫及網站建置二個子題，並利用圖庫初建「水稻病蟲害診斷專家系統」。「精準農業自動化農機操作系統」則從事關鍵組(元)件的開發及適合國內情境系統的研究，分成(1)精準農業作物產量分佈圖偵測系統之開發、(2)田間作物性狀定點精準感測系統之開發研究、(3)田間精準噴藥系統之研究及(4)田間定點精準變異率施肥系統之研究等四個子題。除了上述各個子題分別成立細部計畫之外，另設立實際經營與管理精準農業試驗農場運作的單位(農場組)，各方配合試驗研究需要進行農場作業，務使計畫順利圓滿的進展。

五、「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫介紹

「精準農業」引入國內的時間甚短，因此為期約四年(1999 年 12 月至 2003 年 12 月)的「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫處於啓萌階段，故予定位為先驅性試驗研究，主要在於規劃「水稻生育狀態與環境監測系統」、「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」及「精準農業自動化農機操作系統」等三大研究系統，分工協力進行預定的研發工作，以建立關鍵技術與組件及資料庫為主。本項統籌計畫主持人兼統籌人為農委會農業試驗所林俊義所長，計畫聯絡人為農業試驗所農藝組楊純明研究員，曾先後參與協助計畫推動的副統籌人為農委會農糧處農政科陳文德科長、農產科廖進芳科長和前農業試驗所劉大江副所長。

1.水稻生育狀況與環境監測系統

雖然隨著計畫的執行過程酌有調整，大致上「水稻生育狀況與環境監測系統」內含四個大主題(細部計畫)，每一主題又含有若干重要研究項目/目標，由國內五所大學和研究機構相關研究人員參與。

「水稻生長、逆境及產量之監測與估測技術和應用」細部計畫分別在近地面、航空及衛星遙測載台，利用光譜遙測技術結合地面水稻植株的性狀調查，探討水稻全生育期的生長、發育、氮素狀態及病蟲害發生等逆境造成之植被反射光譜改變，篩檢鑑識與判別用的光譜特徵波段，建立近地面光譜特徵模式、光譜辨識技術及相關地真資料庫，並改進大氣校正技術，以建構應用 SPOT 遙測衛星和直昇機搭載多光譜遙測系統進行田間水稻生長(育)狀態、蒸發散量評估、產量預估及多種逆境等級區分之遙測模式與監測系統。

「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫在於偵測水稻穗肥施用時期的稻株氮營養狀態及相對應植被反射光譜的變化，發展可迅速檢測稻株氮營養狀況的光譜遙測模式，並研發搭載於不同遙測載台(手持、高空作業車、直昇機)之感測系統。同時利用攜帶式葉綠素測計，建立測計讀值與稻株葉綠素及氮素狀態之相關模式，俾進行簡單易行的稻株氮營養狀態估測與監測，可適用於小田區生產系統。計畫之研究產品將分別適用於不同田間條件之稻株氮營養狀況空間分佈調查，而應用於穗肥之精準施用管理。

表 1. 「水稻生育狀態與環境監測系統」研究團隊與分工。

項目名稱/目標	研究單位	負責人
「水稻生育狀態與環境監測系統」(召集人:中興大學土壤環境科學系申雍教授)		
「水稻生長、逆境及產量之監測與估測技術和應用」細部計畫(計畫主持人:工研院能資所吳啓南研究員)		
(1)利用近地面植被光譜特徵估測水稻生長、產量、病蟲害(稻熱病與褐飛蝨)感染及氮素狀態之遙測技術研究	農業試驗所農藝組	楊純明研究員
(2)機載多光譜遙測系統之建構與應用	中央大學太遙中心	劉振榮教授
(3)SPOT 衛星影像大氣校正技術研發	環球技術學院資管系	劉建慧助理教授
(4)SPOT 衛星影像與地面近紅外光成像儀之應用	工研院能資所	吳啓南研究員
(5)利用遙測技術估算水稻田蒸發散量之研究	中央大學太遙中心	劉說安教授
「稻株氮營養狀況偵測技術和應用」細部計畫(計畫主持人:中興大學土壤環境科學系申雍教授)		
(1)稻株氮營養狀況遙測技術研究	中興大學土環系	申雍教授
(2)葉綠素計應用模式開發	農業試驗所農藝組	楊純明研究員
「水稻光譜資料庫建置與應用」細部計畫(計畫主持人:環球技術學院資訊管理系劉建慧助理教授)		
「土壤性質及肥力狀態偵測技術與應用」細部計畫(計畫主持人: 農業試驗所農化組王鐘和副研究員)		
(1)土壤重要性質及肥力狀態偵測技術	農業試驗所農化組 中興大學土環系	王鐘和副研究員 陳仁炫教授
(2)精準農業共同試驗田區土壤資料空間變異分析	農業試驗所農化組	劉禎祺助理研究員

「水稻光譜資料庫建置與應用研究」細部計畫著力於建立近地面水稻植被反射光譜資料庫，能夠系統性的收納與整理由各研究單位逐年累積之多種地面植被反射光譜及相關的情境調查資料，以供後續開發其他有關水稻生長、逆境及產量之估測與預測技術等用途。

「土壤性質及肥力狀態偵測技術與應用」細部計畫以發展田區土壤性質與肥力狀態空間分佈偵測技術爲目標，研製具有自動定位功能的自動式田間土壤採樣設備與檢測系統，以快速調查田間土壤性質及肥力狀態之空間變異分佈，評量田間土壤性質及肥力狀態之空間分佈特性和水稻生長與產量間的相關性，組設簡易的快速偵測系統而應用於田間基肥與追肥的精準施用管理。

2.水稻栽培與環境精準管理專家決策系統

「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」初期擬定二個大主題，優先考量肥料的管理及資料庫的建立，以農委會農業試驗所內的研究人員爲主，涵蓋農藝、農化、植病、昆蟲、農業氣象及資訊等專業領域，重要工作項目與負責人如表 2 所示:

「水稻精準施肥決策專家系統之建立」細部計畫考量肥料的精準管理，整合以往試驗研究成果擬定水稻栽培的氮、磷、鉀肥的施肥推薦原則，配合環境的改變而應用生長模式及地理資訊系統串聯農耕資料、土壤資料、氣象資料及作物生育與營養狀態資料等，做出施肥決策圖以實施肥料的精準管理。

「精準農耕綜合資料庫及網站建置」細部計畫在於開發系統軟體整合「水稻精準農業(耕)體系之研究」統籌計畫下各細部計畫的試驗成果書面資料及各種資料庫，掛存於架設的伺服網站提供網路資料查詢、更新與下載，作爲研究人員和一般民眾資訊交流管道，達到共享式的多使用者環境。並期藉著網際網路的訊息交換與流通，提升計畫執行效率和安全管控，促進國內及國際間專業人士的良性溝通。

表 2. 「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」研究團隊與分工。

項目名稱/目標	研究單位	負責人
「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」計畫(系統召集人: 農業試驗所農化組劉滄棽助理研究員)		
「水稻精準施肥決策專家系統之建立」細部計畫(計畫主持人: 農業試驗所農化組陳琦玲助理研究員)		
(1)水稻精準施肥決策系統建置	農業試驗所農化組	陳琦玲助理研究員
(2)應用水稻生長模式輔助施肥管理決策之研判	農業試驗所農化組	林毓雯助理研究員
(3)不同氮營養狀態下水稻生育及穗肥氮肥推薦基準研究	農業試驗所農化組	王鐘和副研究員
「精準農耕綜合資料庫及網站建置」細部計畫(計畫主持人: 農業試驗所農化組劉滄棽助理研究員)		
(1)空間資料庫資料建置與共享網站維護	農業試驗所農化組	劉滄棽助理研究員
(2)氣象環境調查	農業試驗所農工組	蔡金川副研究員 姚銘輝副研究員
(3)水稻生育調查	農業試驗所農藝組	陳治官副研究員
(4)水稻病害調查	農業試驗所植病組	張義璋副研究員 謝麗娟技佐
(5)水稻蟲害調查	農業試驗所應動組	余志儒助理研究員
(6)水稻病蟲害診斷專家系統之建立	農業試驗所農化組	劉滄棽助理研究員

3.精準農業自動化農機操作系統

「精準農業自動化農機操作系統」分成四大研究主題(細部計畫)，由國內六所大學和研究機構相關研究人員參與，各主題之重要工作項目/目標及負責人如表 3 所列示:

「精準農業作物產量分佈圖偵測系統之開發」細部計畫在於開發適合國內水稻收穫之定點稻穀產量及水分即時偵測系統，並裝配全球定位系統與地理資訊系統俾繪製田區稻穀產量空間變異分佈圖，又配置立體機械視覺組件以繪製立體視覺空間變異分佈圖，綜合以生產稻穀產量偵測追蹤機具爲終極產品，亦可提供農場管理決策分析用途。

「田間作物性狀定點精準感測系統之開發研究」細部計畫以應用多光譜影像遙測技術爲初期重點，發展稻株含氮量地面多光譜影像遙測系統，提供地面即時的稻株氮營養狀態，作爲施用氮肥的精準管理應用。該項系統經過修正改良，亦可適用於旱田農作物植體氮營養狀況的偵測。

「田間精準噴藥系統之研究」細部計畫分別開發具有定位及可變率功能的氣輔式及桿式噴藥機具，藉由裝配全球定位系統與地理資訊系統達到定位噴施目的，再由變率組件的設置獲得噴施量的調整。未來將朝向依據專家決策系統提供變異噴施決策圖來進行差異性噴施操作的方向繼續研究，改進田間定點變率噴藥作業。

「田間定點精準變異率施肥系統之研究」細部計畫以改良深層施肥機具爲目標，加裝全球定位系統與地理資訊系統進行定位施肥作業。未來亦將朝向依據專家決策系統提供變異施肥決策圖來進行差異性施肥操作的方向繼續研究，於插秧時同步進行田間定點定量的施肥作業。

表 3. 「精準農業自動化農機操作系統」研究團隊與分工。

項目名稱/目標	研究單位	負責人
「精準農業自動化農機操作系統」(系統召集人：臺灣大學生物產業機電工程學系盧福明教授)		
「精準農業作物產量分佈圖偵測系統之開發」細部計畫(計畫主持人：臺灣大學生物產業機電工程學系盧福明教授)		
(1)國產感測器之開發	臺灣大學生機系	盧福明教授
	農業試驗所農工組	蔡致榮副研究員
(2)國產水稻產量圖偵測系統之開發	臺灣大學生機系	盧福明教授
	岡山農工職校生機科	張福祥主任
(3)立體機械視覺空間製圖系統之研發	臺灣大學生機系	盧福明教授
	宜蘭大學生機系	林連雄講師
「田間作物性狀定點精準感測系統之開發研究」細部計畫(計畫主持人：臺灣大學生物產業機電工程學系陳世銘教授)		
(1)多光譜遙測系統	臺灣大學生機系	陳世銘教授
(2)田間作業機	農業試驗所農工組	楊智凱助理研究員
(3)地面遙測判讀模式	嘉義大學生機系	吳德輝講師
「田間精準噴藥系統之研究」細部計畫(計畫主持人：農業試驗所農工組梁連勝組長)		
(1)變率噴施系統之整合與改良	農業試驗所農工組	梁連勝組長
	臺灣大學生機系	葉仲基副教授
(2)作業機構之分析與改良	農業試驗所農工組	梁連勝組長
「田間定點精準變異率施肥系統之研究」細部計畫(計畫主持人：中興大學生物產業機電工程學系謝禮丞教授)		
(1)水稻變率施肥機之改良	中興大學生機系	謝禮丞副教授
(2)水稻變率施肥機之試驗	農業試驗所農工組	黃禮棟副研究員
(3)自走式土壤取樣機具的研製	中興大學生機系	欒家敏教授

六、「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫之執行檢討

從先驅性試驗研究計畫的角度來看，「水稻精準農業(耕)體系之研究」科計計畫的執行是相當成功的。「精準農業」一詞已普植於國內學術研究人員腦海中，大多數研究項目也已達到計畫原先所設定的目標。在監測系統的研究上，收集與分析了許多地眞及不同遙測載台的資料，建立適合不同情境的基礎光譜遙測模式，也分別發展出在直昇機、衛星及地面遙測載台操作的監測技術。在決策系統的研究上，初步開發了一套施肥決策系統軟體一套，可依據品種、水田生產力等級、期作生產力、有機資材施用量、米質要求、土壤質地及施肥方式等因素推薦氮肥用量和分配比率，並可依據稻株氮營養狀態調整穗肥之氮肥用量。也能夠依照土壤化學分析結果，根據品種特性及土壤性質來推薦磷、鉀肥用量與分配比率。又規劃了直接控制農機進行定位變量施用及產生施肥決策圖檔的功能，提供未來農機進行變量施肥採用。而藉由設置共同資料庫網站，將可收錄共同試驗田區的各項紀錄及資料庫，未來可利用地理資訊系統建立空間分佈圖層，作爲後續試驗研究之用。

在農機系統的研究上，共計開發了作物產量分佈圖偵測系統、田間作物性狀定點精準感測系統、田間精準噴藥系統及田間定點變異率施肥系統等四項成果。伴隨這些系統芻型所發展出來的技術與組件，將可應用於相關農機產品的研發與技術水準的提昇，也助益於農業機械人才的培育養成。未來配合確定的特定目標，以上的芻型系統很快就能改良成爲可供實用的農機成品，而新技術與組件的巧思整合，將可以研發出無數有用的新興產品。

在學術與推廣方面，在計畫執行期間舉辦了四次中大型研討會/展示會，包括 2000 年 4 月 25 日的「水稻精準農業(耕)體系之研究」工作研討會、2001 年 8 月 30 日的「水稻精準農業(耕)體系之研究」階段性成果研討會及 2002 年 10 月 3 日和 2003 年 9 月 17 日的「水稻精準農業(耕)體系之研究」計畫成果研討會暨展示會。讓各界人士瞭解農業的最新發展，認識新科技在農業上的深耕與開花結果，並因此學習「精準農業」有關的知識、技術、組件與系統。而 2000 年"水稻精準農業(耕)體系之研究"、2002 年"應用於水稻精準農業體系之知識與技術"及 2003 年"水稻精準農業體系"等三本專書的出版，除了呈現執行計畫的成果外，更延廣了執行計畫的教育成效。參與本計畫的研究人員，在計畫執行期間也先後將研究成果發表於國內外刊物中，期刊論文、研討會論文及其他推廣性報告已超過 80 篇以上，同時提供同儕檢驗及藉以激發新創意。

但是，由於「精準農業」在國內仍屬新興科研項目，第一階段的四年研究計畫中較爲欠缺系統的整合及操作系統獲得的經濟效益評估，因此難以評估國內發展精準農業的遠景。在無法展示「精準農業」成效的前提下，農政主管部門將無以深入瞭解研發及執行精準農業可能遭遇的問題，導致其關心和支持程度也就相對減弱。其次，推廣精準農業體系的動力根源，立足於經濟效益的提升、生態環境的保護、社會對農業評價的抬頭及相關科技的研發成果。換言之，必須使得農民或生產者認同精準農業具有降低資材投入及提高資源使用效率的潛能，並在新技術新製程的利用上獲得大幅改進，亦提供生產收益及社會價値誘因，願意改變其慣行操作方法、消費方式與工作型態，那麼精準農業才能順利的被接受和推廣。

七、結語

展望未來前景，倘若農政部門持續支持「精準農業」的試驗研究，建議第二階段的研究計畫當著力於特定目標系統的整合及特定目標精準農業系統效益驗證與操作展示等工作。如此，不但可以在既有的基礎上設定實務研究主題，也務實的開發出解決特定目標的精準管理操作系統，將研究主題的成果落實成爲「精準農業」的成功案例。無論以減少非必要資源浪費、保護生態環境或是提升產品質量爲主要目標，祇要有了具體可行的操作系統及成功案例的實證，即可快速的將「精準農業」延廣至不同產業情境，推廣及各種產業層次，從而全面建立適合國內的各類型精準農業體系。

八、誌謝

本項研究承蒙行政院農業委員會農業試驗所經費(89 遙測-4.1-糧-41(Z), 90 農科-4.1.1-農-C2(Z), 91 農科-5.1.3-農-C2(Z), 92 農科-1.1.6-農-C1(Z))支持，謹藉以表示由衷感謝。

九、引用文獻

楊純明、林俊義(主編)。2000。水稻精準農業(耕)體系之研究。行政院農委會農業試驗所出版，臺中縣。129pp.

楊純明、林俊義(主編)。2002。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。行政院農委會農業試驗所出版，臺中縣霧峰鄉。221pp.

Agrartechnik Bornim. 2003. Program of the joint conferences 4 ECPA-1 ECPLF. June 15-19, 2003. Berlin. Leibniz Institute for Agricultural Engineering Bornim, Potsdam, Germany.

Stafford, J. and A. Werner. 2003. Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.

Precision Agriculture Center. 2002. Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management. July 14-17, 2002. Minneapolis, MN, USA.

Studies on Rice Precision Farming System

Chwen-Ming Yang[2] and Chien-Yih Lin[2]

[1]Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC

[2] Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Taichung, Taiwan, ROC

E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

From the standpoint of a pilot project, the 'Studies on Precision Farming System for Rice' is a successful one. The term Precision Agriculture has been stapled clearly into researchers' mind and accepted as newly evolved academic area in Taiwan. Most of the pre-planned goals in topics of project have been achieved soundly providing promising perspectives. There were four symposia and exhibitions held during the period of project execution (2000-2003) to introduce and make known itself to colleagues from all academic fields as well as to the general public. Three specialized books were printed to present the fruitful results from project carried out and the related information for extension and education purposes. More than 80 papers have been published in journals, proceedings and other easy-to-read magazines. However, as precision agriculture still in its enfant phase in the Island, this 4-year project emphasized more on basic research than on system development. Without actual field practices and profit assessments, it is hard to evaluate the outgrowth of precision farming development at this stage. And the care and support from the government and other agriculture sectors may hold their hands owing to the lack of guarantee benefits in the near future. In the forth coming years with the support from government agency, research is suggested to focus on system organization and examination to test its functionality and profitability. Most of all, the specific targets and research goals should be set clear before project going to start. With everything well prepared and in gear, it can be expected to wait for an abundant harvest.

Key words: Rice precision farming system, Precision agriculture, Precision farming

水稻精準農業體系
由植被高解析反射光譜模式化稻株生長
13-24, 2003

由植被高解析反射光譜模式化稻株生長

楊純明*、陳榮坤
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 14

一、前言 ---------- 14

二、方法簡述 ---------- 15

三、結果與討論 ---------- 17

四、結語 ---------- 21

五、誌謝 ---------- 21

六、引用文獻 ---------- 22

ABSTRACT ---------- 24

由植被高解析反射光譜模式化稻株生長

楊純明*、陳榮坤
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本文研究旨在探討近地面量測之水稻植被高解析反射光譜之季節變化，並試以利用不同方法來篩檢估測水稻生長的光譜特徵並建立光譜遙測模式。高解析光譜係以田間攜帶式高解析輻射光譜儀偵測，生長性狀則於量測光譜時取樣調查，試驗期間為 2000-2002 年之一、二期稻作，計有四期作。篩檢之光譜特徵為可見光之綠光波段峰點(GREEN)、紅光波段之谷點(RED)及近紅外光之波段頂點(NIR)，而光譜指數係由此三項動態特徵之反射比計算，包括 R_{RED}/R_{NIR} ratio、R_{GREEN}/R_{NIR} ratio、R_{RED}/R_{GREEN} ratio 及 NDVI(normalized difference vegetation index, 標準差植被指數或稱正規差植生指數)。試驗發現稻株之生長性狀於抽穗前後達到最高點，再隨著成熟老化而下降。據此，將水稻生育全期以抽穗為分割點劃分為抽穗前期(pre-heading phase)及抽穗後期(post-heading phase)，可提高光譜特徵及光譜指數與生長性狀間之相關性。又由多元直線複迴歸(MLR)分析，可經由對決定係數(coefficient of determination, R^2)的要求，來選取光譜中合適的光譜特徵波段數目以建立多元直線複迴歸模式估測稻株之生長。根據研究結果，多元直線複迴歸模式確實提供了選取光譜特徵的彈性，同時也改進了對稻株生長變異的估測。

關鍵詞： 高解析反射比光譜、水稻生長模式化、直線複迴歸、光譜特徵、光譜指數。

一、前言

遙測技術的優點之一，在於能夠提供相當準確與精確的大面積被測地表物件的即時狀態資料，俾於即時或及時評估而採行適當的因應對策(Barrett and Curtis, 1982)，具有實用的經營管理功效。在農作物生產管理流程上，運用遙測技術之前必先熟知農作物植被的光譜性質，釐清外觀物理徵狀有關的光譜特徵波段，並建立估測的光譜遙測模式(Gates *et al*., 1965; Gausman *et al*., 1969, 1971; Rouse *et al*., 1974; Tucker *et al*., 1979; Wiegand *et al*., 1991; Wooley, 1971; Yang and Su, 1997)。自從美國大地衛星 Landsat 於 1972 年發射及後續資源衛星升空從事商業運轉以來，針對衛星波段和地物關係的研究及應用與日俱增，由於早期的衛星多以寬頻感測器為主，因此光譜指數的發展獲得普遍的認同及採用。光譜指數通常選用 1-3 個特徵波段，依波段代表的物理化學意義組合成邏輯運算式，用以連結作物植被的外觀徵狀而賦予估測與追蹤的功能(Anderson and Hanson, 1992; Baret and Guyot, 1991; Clevers, 1986; Elvidge and Chen, 1995; Gilabert *et al*., 1996; Huete, 1988; Price, 1992; Price and Bausch, 1995; Wiegand *et al*., 1990)。這些基於

波段比值所建立的光譜指數，例如NDVI(Rouse *et al.*, 1974)及SAVI(soil-adjusted vegetation index，土壤校正植被指數)(Huete, 1988)，因具有降低光源背景干擾的作用而廣受歡迎，其資料的取得與計算簡便易行。

近幾年高解析資源衛星資料也邁入商業化，更加開拓了遙測技術的視野與應用層面，同時大幅促進了高解析光譜的研究探討。許多統計方法被利用來分析被測物的反射光譜，以嘗試結合更多的光譜特徵波段來萃取光譜資訊及提高估測的準確度，增進辨識與判別的功能(Wanjura and Hatfield, 1987)。例如藉由複迴歸分析，研究發現由多個光譜特徵波段構成的多元直線複迴歸模式(MLR, multiple linear regression model)，可以彈性的篩檢有關的光譜特徵波段，因而提供了較佳的光譜訊息及估測準確度(Lawrence and Ripple, 1998; Shibayama and Akiyama, 1991; Thenkabail *et al.*, 2000)。惟儘管如此，由於農作物在生育過程中會受到環境與栽培管理措施的影響而改變植被反射光譜，因此應當究明收錄於多元直線複迴歸模式的光譜特徵是否依然能夠於外在因子影響下恰如其份的反應作物生長狀態(Thenkabail *et al.*, 2000)。又這些光譜特徵之間若未予相關程度的檢定與區分，可能存在共線性(collinearity)問題，而產生過度最佳化(over fitting)現象，高估了MLR模式的適用性(Blackburn, 1998; Thenkabail *et al.*, 2000)。所以，在利用高解析光譜進行多元複迴歸分析時，應當審慎篩檢最合適的光譜特徵波段組合，才能避免額外的選取，獲得對性狀估測的實際改進。

本研究以臺灣地區最主要的糧食作物—水稻為試驗對象，由近地面高解析植被反射光譜及生長性狀的定期追蹤量測，篩檢出光譜特徵波段，並由光譜指數及多元直線複迴歸分析方法比較對稻株生長估測的優劣。

二、方法簡述

本研究田間試驗於2000-2002年兩期稻作期間在臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場(TARI, 24°45'N, 120°54'E, elevation of 60 m)實施，以進行對水稻植被高解析光譜及生長性狀的定期追蹤量測。參試水稻(*Oryza sativa*)品種為臺農67號，每叢3-5株，行株距0.3 m × 0.18 m，族群密度185,000 hills ha^{-1}。本研究分為二項試驗，試驗一計有四期稻作，主要目的在建立光譜特徵與生長性狀間之遙測模式。其中，一期稻作分別於2000年2月18日及2002年2月27日插秧，於2000年6月16日及2002年6月25日收穫；二期稻作則分別於2000年8月5日及2001年8月3日插秧，而於2000年12月6日及2001年11月26日收穫。

試驗田區劃分為20小區，每小區約0.5 ha，土壤酸鹼值從4.46至5.73不等，有機質含量範圍介於1.10%至2.11%之間。移植前5-7天施用臺肥39號複合肥料($N:P_2O_5:K_2O$=12%:18%:12%，臺灣肥料公司，高雄市)300 kg ha^{-1}為基肥，第一次追肥於移植後1週(二期作)或2週(一期作)施用臺肥1號複合肥料($N:P_2O_5:K_2O$=20%:5%:10%，臺灣肥料公司，高雄市)100 kg ha^{-1}，第二次追肥以臺肥1號複合肥料200 kg ha^{-1}於移植後3週(二期作)或4週(一期作)施用，抽穗前20天施用硫銨(21% N，臺灣肥料公司，高雄市)160 kg ha^{-1}為穗肥。農藥使用依照前臺灣省政府農林廳出版之植物保護手冊(Plant Protection Manual, 1994)推薦用藥及用量操作，除草劑丁基拉草(butachlor，5%granule，30 kg ha^{-1})於插秧後一週內施用，本達隆溶液(bentazon，44.1%solution，200X，3 L ha^{-1})於插秧後3週施用；另以殺蟲劑6％培丹粒劑(cartap，30 kg

ha^{-1})防治二化螟蟲及瘤野螟，以殺菌劑 40％加保扶水懸劑（carbofuran，800X，1.2 L ha^{-1}）及 50％維利黴素(Validamycin A, 50% S，1000X，1 L ha^{-1})防治紋枯病及其他害蟲。

試驗二在 2002 年的兩期稻作生育期間進行，另外選用 6-7 小區施以不等量氮肥，以產生不同生長表現及光譜變異之水稻族群，並以驗證試驗一建立之多元直線複迴歸模式之適用性。其中，一期稻作之插秧日期爲 2 月 2 日，收穫日期爲 6 月 18 日；二期作則於 8 月 8 日插秧，於 11 月 20 日收穫。每小區面積 500 m^2，除了氮肥施用量處理之外，其餘栽培管理皆如試驗一。氮肥用量於一期稻作分別爲 0、30、60、90、120 及 150 kg ha^{-1} 等六種等級，二期作則爲 0、30、60、90、120、150 及 180 kg ha^{-1} 等七種級差。植被反射光譜的量測及稻株生長性狀的調查，在水稻插秧一個月後定期實施，此時植被光譜將不致受到土表及灌溉水的干擾(預備試驗結果)。

生長性狀的調查係於測定光譜後取樣(每小區 6 叢)，調查包括鮮葉重與乾葉重、鮮稈重(葉加莖)與乾稈重、葉面積及株高等六項生長性狀。葉面積指數(leaf area index, LAI)係以單位取樣面積之累積鮮綠葉表面積的比值(m^2 m^{-2})表示。水稻族群植被反射光譜乃以田間攜帶式輻射光譜儀(spectroradiometer，model GER-2600，Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA)進行光輻射(radiance)的測定，將目標植被區之光輻射除以同波長之已知反射光譜特性的標準白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, U.S.A.)反射光輻射(即參考值)來計算反射比。量測系統包括具有 10 度視角(field-of-view，FOV)掃描鏡頭的光譜儀、手提筆記型電腦、電池及電纜線等，光譜範圍 330-3600 nm，由電腦中內建的 GER 程式(GER-2600 User Manual, 1996)進行量測操作，並僅選取 350-2400 nm 波段的反射比光譜，以避免光譜兩端的硬體電磁干擾。系統安裝固定於距離植被約 5.8 m 之機動式高空作業車上垂直偵測植被反射光譜，每一塊試驗小區逢機量測 15 定點，每一定點預設爲 4 次掃描之平均值，取 15 定點均值之平均值反射比曲線爲該區代表。光輻射量測時間於上午十時至下午一時之間，選擇晴朗無雲時段偵測，以減少太陽入射角及遮雲的干擾。

試驗資料之統計分析係由 SAS 8.1 軟體(Statistical Analysis System version 8.1, 1998)及 Sigmaplot 2000 軟體(SPSS ASC BV, The Netherlands)運算，虛擬變數檢定(dummy-variable test)用於比較資料在期作間及年份間之差異性，反射光譜曲線之光譜特徵波段選取綠光波段之峰點(GREEN)、紅光波段之谷點(RED)及近紅外光波段之頂點(NIR)，再由其等之反射比計算組合比值 R_{RED}/R_{NIR} ratio、R_{GREEN}/R_{NIR} ratio、R_{RED}/R_{GREEN} ratios，以及標準差植被指數 NDVI(公式 $NDVI=(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$)。另光譜特徵之紅光臨界中點(red edge midpoint)爲紅光臨界區間(red edge span)中間值之窄波段位置，後者係指介於 RED 至 NIR 的波段區間，而紅光臨界斜率則爲紅光臨界中點的斜率。多元直線複迴歸(MLR models)分析先以 SAS 的 Collinearity Diagnostics 及 R-square Selection methods 篩檢合適的光譜特徵，再以 Step-wise Selection procedure 產生 MLR 模式。光譜特徵的多寡由決定係數(determination coefficients，R^2)大小來判別，經由選擇合適的 R^2 值來決定最適的光譜特徵。

三、結果與討論

在利用寬頻波段之光譜遙測進行農作物生長狀態監測的系統中，必須釐清光譜特徵波

段反射比及光譜指數與生長性狀的關係，並建立光譜遙測模式以從事農作物的精準管理。藉由這些特定目標的光譜特徵模式，或追蹤作物的生長、或預測作物的產量，達到快速而非破壞的定性與定量大面積作物現況的目的。本研究由近地面量測的水稻族群植被高解析反射光譜(350-2400 nm)，可以獲知光譜曲線在全生育期間的變化輪廓(資料未列出)。顯示出水稻反射光譜類似於一般綠色植物的光譜曲線模型，以紫外光及可見光的反射比較低，近紅外光的反射比較高，而在短波紅外光及中紅外光的變動與落差較爲劇烈。在可見光之中，反射比的波峰出現在綠光波段，波谷則分別落在藍紫光及紅光波段，如陳等(2001)之試驗結果。

水稻光譜曲線在常態環境下全生育期的變化呈現規則性波動，顯示光譜的改變受到內在生育進展及外在環境的雙重影響，稻株生長性狀亦復如此，無論期作或年份多爲凸形二次曲線趨勢(圖 1)，而不同年份之間存在變異。稻株外觀形態隨著生長發育在葉色、莖葉分佈及生殖器官演化上皆出現明顯的時空變化，當然將造成植被光譜的差異，這些現象反映出兩者之間的密切互動，也將會顯示出形態與光譜的因果關係。由圖之生長性狀表現，可以看出生長性狀在稻株近抽穗時期達到最高點，其後即扮隨成熟老化過程而逐漸下降。一般言之，生長性狀在抽穗前後出現高原期，隱示從營養生長期轉換至生殖生長期將有顯著的形態改變，稻株通常在步入生殖期前達到其生長的高峰，隨後即邁向生長衰退的老化期。這種形態的轉變文獻上有許多報告(Baret *et al.*, 1989; Wiegand *et al.*, 1991; Yang and Su, 1997, 1998; Yoshida and Ahn, 1968)，並且顯徵於光譜指數在生育期間的變化，如 Gilabert *et al.*(1996)指出玉米植被光譜計算的 NDVI 及 SAVI 兩項光譜指數，其凸形二次曲線變化正如生長性狀在生育期間的表現。可以預見將光譜特徵或光譜指數的曲線變化依照生長性狀的曲線趨勢，在生長最高點切割成營養生長相及生殖生長相，分別予以建立相關模式，將可能提高模式的相關性(Yang and Su, 1998)。

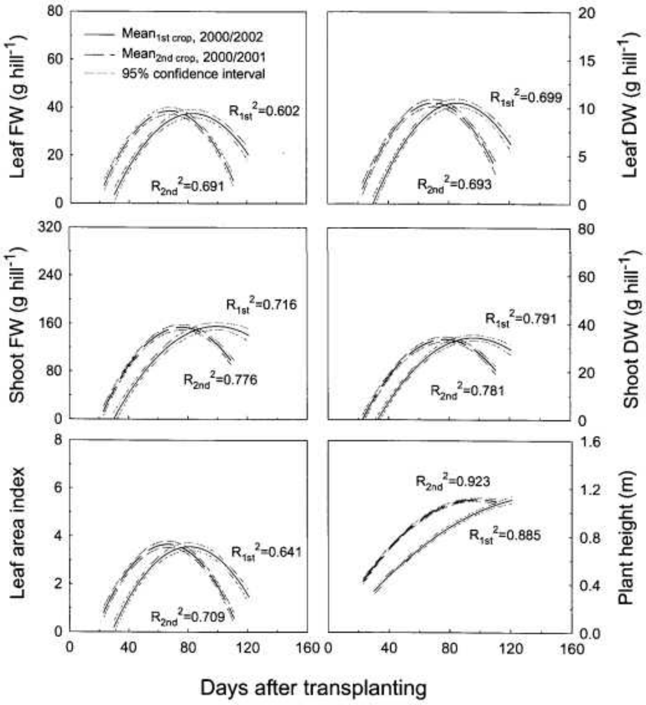


Fig. 1. Changes of growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002. The 95% confidence intervals of each growth parameters are included.

由於一、二期稻作的資料之間未呈現統計上的顯著差異(資料未列出)，乃將兩期作資料合併迴歸分析，以比較生長性狀與光譜指數、光譜特徵的關係。結果顯示，在調查的九種光譜指數及光譜特徵當中，部分指數及特徵與生長性狀的關係爲二次曲線，部分則爲直線關係。其中，營養生長時期的六項生長性狀與所調查的光譜指數及光譜特徵均呈顯著相關(資料未列出)，例如其等與 NDVI 爲指數型正相關(R^2>0.62)(圖 2A)，與紅光臨界斜率則爲直線型正相關(R^2>0.33)(圖 2B)。在生殖生長期

間，生長性狀與光譜指數及光譜特徵之間的關係較不密切，其等與綠光波段峰點反射比(R_{GREEN})、近紅外光波段頂點反射比(R_{NIR})及紅光臨界中點等無顯著相關(資料未列出)；除了株高之外，其等與 NDVI 之間爲指數關係(R^2>0.46)，與紅光臨界斜率則爲直線關係(R^2>0.13)(圖 3A 及圖 3B)。由此結果可知，光譜指數及光譜特徵較能夠在營養生長期反應出稻株的生長狀態，而在同時具有生長與生殖器官複雜形態的生殖生長期及老化走勢下，則不易敏感反應出稻株外觀的生長表現。據此，可利用這些迴歸模式檢視光譜指數及光譜特徵與生長性狀的關係，並以估測或監測水稻生育期間的生長行爲。值得注意的是，非線性的關係將限制比值型(ratio-based)光譜指數的應用(Yang and Su, 1998)，尤其在臨界上限範圍將出現指數的飽和現象(Gilbert *et al.*, 1996; Yang and Su, 1998).

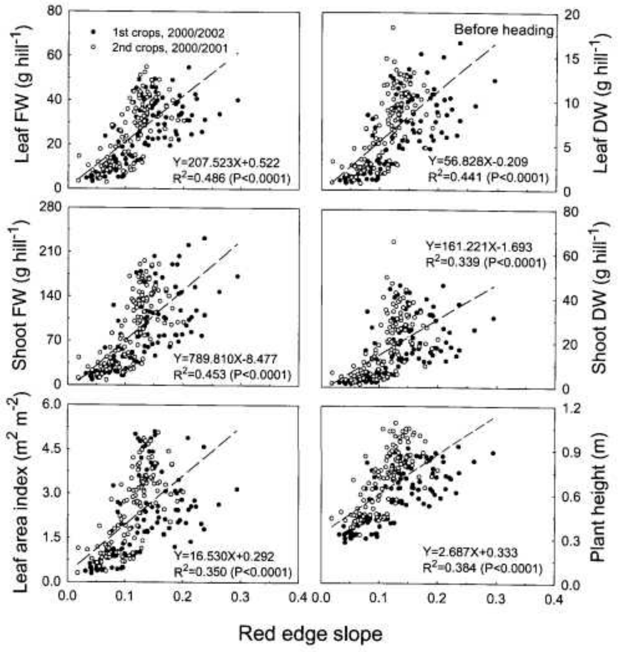


Fig. 2B. Correlations between growth parameters and red edge slope before heading (in vegetative growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

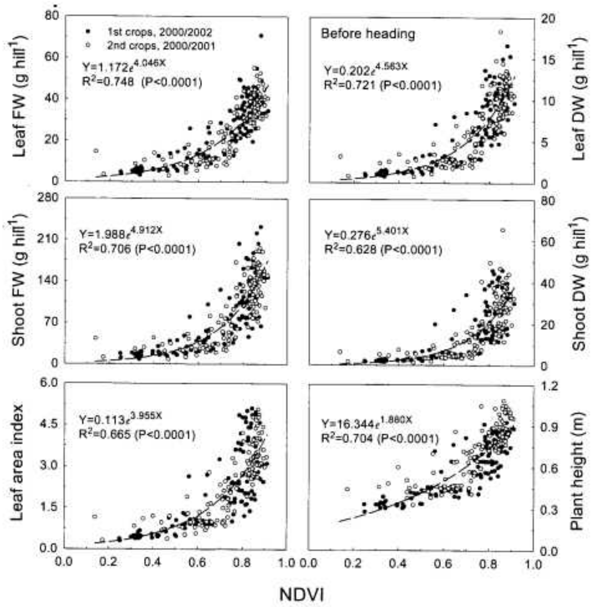


Fig. 2A. Correlations between growth parameters and NDVI before heading (in vegetative growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

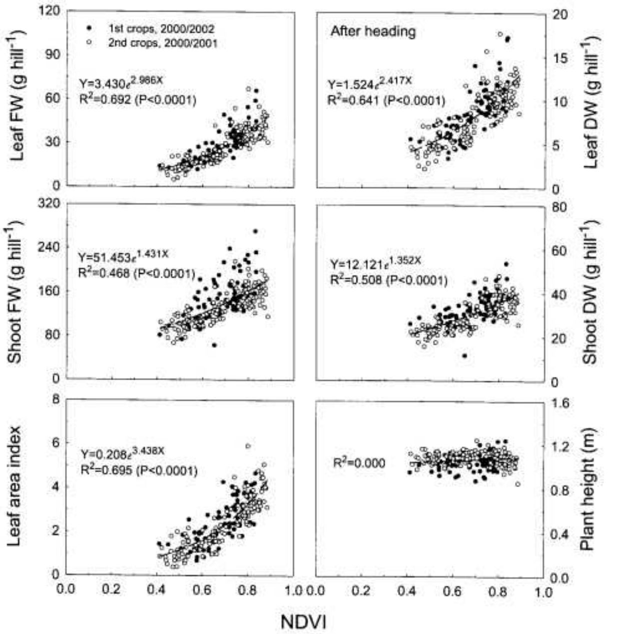


Fig. 3A. Correlations between growth parameters and NDVI after heading (in reproductive growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

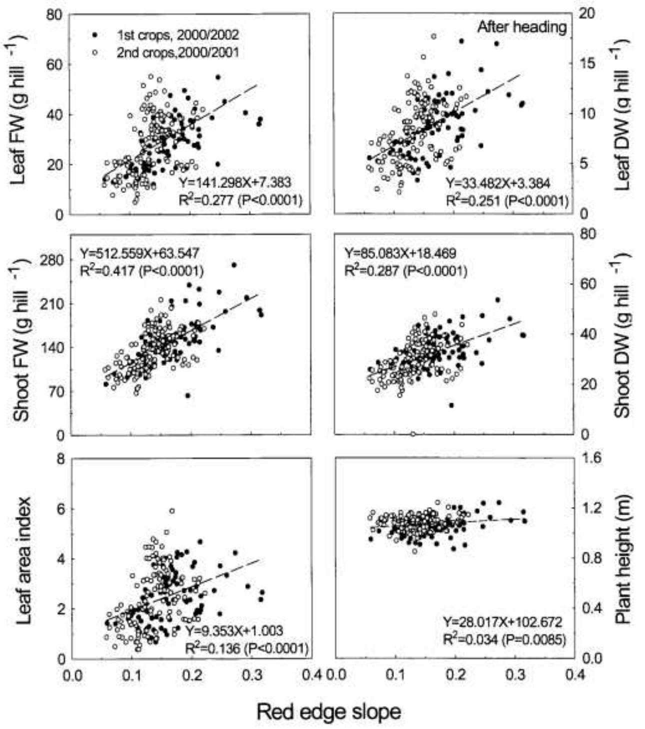


Fig. 3B. Correlations between growth parameters and red edge slope after heading (in reproductive growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

在過去光譜遙測技術發展的三十多年歷程中，以紅光及近紅外光波段反射比爲計算基礎的光譜指數，曾被廣泛的應用於估測綠色植物的生育狀態 (Daughtry *et al.*, 1992; Wiegand *et al.*, 1990)。由文獻資料可知，光譜指數對於葉片的密度與生質量具有對應的變化，也受到環境及土壤背景的影響，同時因觀測角度及光源入射方向的不同而異(Gilabert *et al.*, 1996; Qi *et al.*, 1993; Rondeaus *et al.*, 1996)。本研究進一步發現，稻株抽穗前的均質營養組織使得植被幾何結構及色澤較爲單純一致，抽穗後混合的營養與生殖器官及老化過程帶來色澤上的參差不齊，不僅將改變光譜指數與植被外觀物理徵狀原本相對應的密切關係，更將因爲植被的趨於複雜而使得兩者關係轉爲鈍感。

此外，文獻研究(Lawrence and Ripple, 1998; Shibayama and Akiyama, 1991; Thenkabail *et al.*, 2000; Wanjura and Hatfield, 1987)中亦顯示，組合多個光譜特徵波段反射比的多元複迴歸模式(MLR, multiple linear regression model)，可以改進單一波段反射比與生長性狀關係的敏感性。本研究於是亦進行複迴歸分析以篩檢合適的光譜特徵波段，藉由不同波段組合獲得的決定係數(R^2)高低來選擇光譜特徵數目(資料未列出)，並經共線性檢定後擬出可以接受的多元複迴歸模式，分別以估測不同的生長性狀。如表 1 所列，依照前述試驗結果將稻株生育切割成抽穗前期及抽穗後期兩大階段，並分別爲不同年份，以獲得較佳的迴歸模式。除了抽穗後期的株高之外，其餘五項生長性狀均建立了特定的多元複迴歸模式(R^2>0.43)。而由於 MLR 模式的決定係數大於單一特徵波段及光譜指數模式的決定係數，顯示其等對於生長性狀的變異分佈具有較佳的估測，因此可以獲取較正確的生長資訊。由表 1 的結果也可看出，同期作且同生長階段採用的 MLR 模式所選取的光譜特徵波段可適用於六項生長性狀，惟其參數値有所不同。但是，適用於一期作的模式所包含的光譜特徵波段未必適用於二期作者。

Table 1. The best 2- or 4- variable linear regression models, before and after heading, for growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

Growth parameter	$Y_4=a+a_1R_{\lambda1}+a_2R_{\lambda2}+a_3R_{\lambda3}+a_4R_{\lambda4}$					R^2	P
	a	a_1	a_2	a_3	a_4		
Before heading (the vegetative growth phase)							
First crops, 2000/2002†							
Leaf fresh weight	17.62	-0.76	-0.44	4.42	-5.65	0.779	<0.0001
Leaf dry weight	5.33	-0.23	-0.13	1.29	-1.70	0.765	<0.0001
Shoot fresh weight	73.48	-5.69	0.44	12.22	-18.39	0.729	<0.0001
Shoot dry weight	17.86	-0.73	-0.70	4.74	-6.25	0.700	<0.0001
Leaf area index	2.07	-0.02	-0.16	0.68	-0.79	0.740	<0.0001
Plant height	60.97	-2.71	-0.41	4.72	-5.84	0.777	<0.0001
Second crops,2000/2001‡ @							
Leaf fresh weight	28.22	18.44	-20.16	2.44	-0.93	0.785	<0.0001
Leaf dry weight	8.54	6.37	-6.77	0.71	-0.28	0.756	<0.0001
Shoot fresh weight	107.06	86.26	-90.86	10.36	-5.00	0.825	<0.0001
Shoot dry weight	27.46	23.86	-24.67	2.52	-1.38	0.740	<0.0001
Leaf area index	2.38	1.68	-1.81	0.22	-0.07	0.790	<0.0001
Plant height	73.65	31.82	-33.39	3.76	-1.45	0.825	<0.0001
After heading (the reproductive growth phase)							
First crops,2000/2002§							
Leaf fresh weight	21.24	7.28	-4.57	-3.67	0.78	0.744	<0.0001
Leaf dry weight	6.91	2.61	-2.11	-0.64	0.23	0.732	<0.0001
Shoot fresh weight	96.83	2.16	1.71	-9.30	2.28	0.532	<0.0001
Shoot dry weight	28.31	6.09	-5.05	-1.08	0.50	0.534	<0.0001
Leaf area index	2.58	1.18	-0.89	-0.28	0.07	0.723	<0.0001
Plant height	98.19	-8.53	6.05	0.14	0.12	0.436	<0.0001
Second crops,2000/2001¶							
Leaf fresh weight	30.79	-3.02	0.52			0.734	<0.0001
Leaf dry weight	8.83	-0.73	0.13			0.706	<0.0001
Shoot fresh weight	120.60	-6.98	1.78			0.659	<0.0001
Shoot dry weight	27.78	-1.58	0.38			0.655	<0.0001
Leaf area index	3.13	-0.29	0.04			0.740	<0.0001
Plant height	102.67	0.14	0.14			0.046	0.0627

† $R_{\lambda1}$: reflectance at 541 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 878 nm, $R_{\lambda3}$: reflectance at 1260 nm, $R_{\lambda4}$: reflectance at 1590 nm.

@ $R_{\lambda1}$: reflectance at 506 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 542 nm, $R_{\lambda3}$: reflectance at 1255 nm, $R_{\lambda4}$: reflectance at 1436 nm.

§ $R_{\lambda1}$: reflectance at 510 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 541 nm, $R_{\lambda3}$: reflectance at 676 nm, $R_{\lambda4}$: reflectance at 823 nm.

¶ $R_{\lambda1}$: reflectance at 670 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 808 nm.

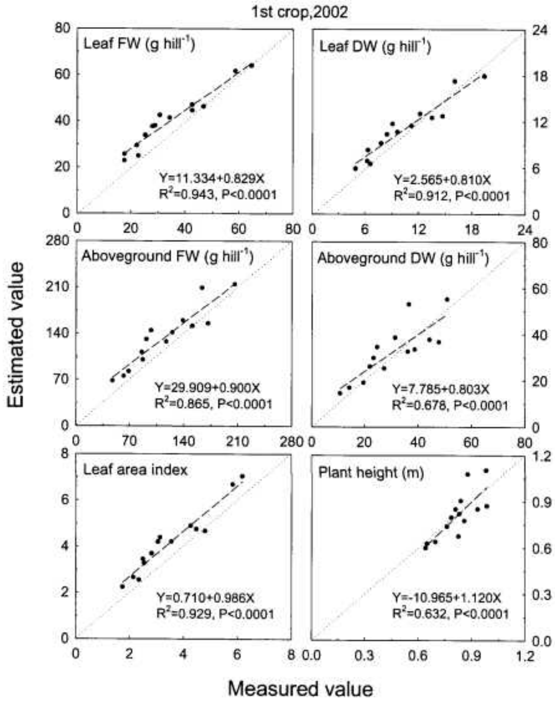


Fig. 4A. Validation of multiple linear regression models for growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first cropping season at the experimental farm of Agricultural Research Institute, COA, Wufeng.

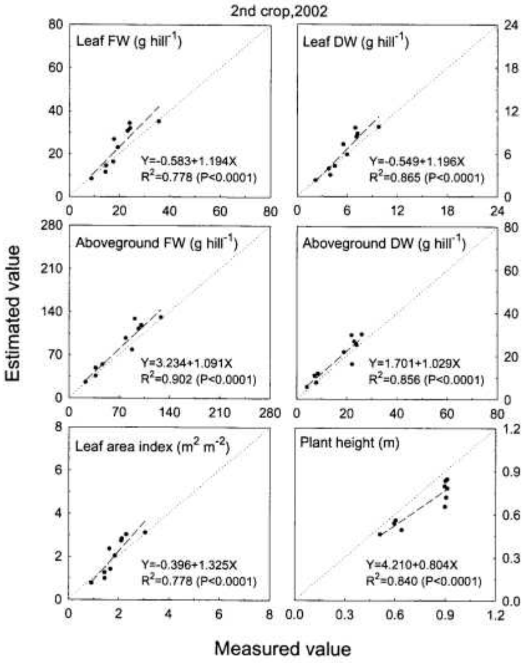


Fig. 4B. Validation of multiple linear regression models for growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the second cropping season at the experimental farm of Agricultural Research Institute, COA, Wufeng.

將另一次試驗的光譜特徵波段反射比輸入前述 MLR 模式，計算出的生長性狀估測值與其實際量取的實測值進行比較，發現於抽穗前的營養生長期得到的資料相關性甚高(圖 4A 及圖 4B)。顯示各生長性狀在營養生長期所建立的 MLR 模式適用性良好，可用於估測及追蹤水稻在兩期作的生育進展。相對而言，本研究也證實了利用多元直線複迴歸分析方法所建立的 MLR 模式，可適用於模式化水稻的生長表現，因而驗證光譜遙測技術應用於監測水稻生長的可行性。

四、結語

根據本研究結果，凡是作物地表上的植被(冠)在形態上(色澤及結構)的變化，能夠經由高解析反射光譜偵測出特定的光譜特徵波段，無論係正常的生育進展或因逆境造成的差異，均得以建立適當的迴歸模式，並反饋應用於生長估測。然而，任何模式都應該包含多年份的資料，容納環境的變異，才眞正具有實際應用的價值。除此之外，本文也必須強調模式驗證的重要性，確認模式在不同條件下的適用性，才能夠讓原本解釋現有資料的關係式轉化成具有估測及預測功能的應用模式。

五、誌謝

本文研究承蒙行政院農業委員會和農委會農業試驗所計畫經費(89 遙測-4.1-糧-41(4)，90 農科-4.1.1-農-C2(01)，91 農科-5.1.3-農-C2(1))支持，謹以致謝。另農委會農業試驗所農場組對精準農業共同試驗田區的妥善管理，僅一併表示感謝。

六、引用文獻

陳榮坤、楊純明、張芳銘、蘇慕容。2001。水稻不同期作植被反射光譜之動態分析。中華農業氣象 8:77-92。

Anderson, G.L. and J.D. Hanson. 1992. Evaluating hand-held radiometer derived vegetation indices for estimating above ground biomass. Geocarto. Intl. 1:71-78.

Baret, F., G. Guyot and D.J. Major. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria 43:241-256.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-174.

Barrett, E.C. and L.F. Curtis. 1982. Introduction to Environmental Remote Sensing. 2nd ed. Chapman and Hall, London. 352pp.

Blackburn, G. A. 1998. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of hyperspectral approaches. Remote Sens, Environ. 66:273-285.

Clevers, J.G.P.W. 1986. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of LAI. p.215-220. *In*:M.C.J. Damen, G. Sicco Smit and H. TH. Vers Tappe (eds.) Proceedings of Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management. August 1986, Balkema, The Netherlands.

Elvidge, C.D. and Z. Chen. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. Remote Sens. Environ. 54:38-48.

Gates, D.M., H.J. Keegan, J.C. Schleter and V.R. Weidner. 1965. Spectral properties of plants. Appl. Opt. 9:545-552.

Gausman, H.W., W.A. Allen, V.I. Myers and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hissutum* L. Agron. J. 61:374-376.

Gausman, H.W., W.A. Allen, D.E. Escobar, R.R. Rodriguez and R. Cardenas. 1981. Age effects of cotton leaves on light reflectance, transmittance, and absorptance and on water content and thickness. Agron. J. 63:465-469.

GER-2600 User Manual. 1996. Version 1.1. Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA.

Gilabert, M.A., S. Gandia and J. Melia. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. Remote Sens. Environ. 55:11-20.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 25:295-309.

Lawrence, R. L. and W. J. Ripple. 1998. Comparisons among vegetation indices and bandwise regression in a highly disturbed, heterogeneous landscape: Mount St. Helens, Washington. Remote Sens. Environ. 64:91-102.

Plant Protection Manual. 1994. Taiwan Provincial Department of Agriculture and Forestry, Nantou, Taiwan. 625pp.

Qi, J., A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr and S. Sorooshian. 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). Remote Sens. Environ. 48:119-126.

Rondeaus, G., M. Steven and F. Baret. 1996. Optimisation of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sens. Environ. 55:95-107.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradiation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III report. Greenbelt, MD, USA. 371pp.

SAS Institute. 1998. SAS/STAT user's guide. Version 8.1. SAS Inst., Cary, NC, USA.

Shibayama, M. and T. Akiyama. 1991. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. Remote Sens. Environ. 36:45-53.

Thenkabail, P. S., R. B. Smith and E. De Pauw. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sens. Environ. 71:158-182.

Wanjura, D. F. and J. L. Hatfield. 1987. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass. Transactions ASAE 30(3):810-816.

Wiegand, C.L., S.J. Mass, J.K. Aese, *et al*. 1990. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. Remote Sens. Environ. 42:1-21.

Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.F. Escobar and A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessment. Remote Sens. Environ. 35:105-119.

Yang, C.-M. and M.-R. Su. 1997. Analysis of reflectance spectrum of rice canopy. (in Chinese) Chinese J. Agromet. 4:87-95.

Yang, C.-M. and M.-R. Su. 1998. Seasonal variations of reflectance spectrum and vegetation index in rice vegetation cover. p.574-593. In: Proceedings of the 3rd Asian Crop Science Conference. April 27-May 2, 1998. Chinese Society of Agronomy. Taichung, Taiwan.

Yoshida, S. and S.B. Ahn. 1968. The accumulation process of carbohydrate in rice varieties in relation to their response to nitrogen in the tropics. Soil Sci. Plant Nutr. 14:153-161.

Using Hyperspectral Reflectance Data to Modeling Rice Growth

Chwen-Ming Yang* and Rong-Kuen Chen
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Experiments were conducted to study the seasonal changes of rice canopy reflectance spectra from near ground platform and to modeling rice (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) growth from the related spectral characteristics and spectral indices. Reflectance spectra were taken by a field-portable spectroradiometer and growth parameters were measured after spectral measurements regularly during the first and the second cropping seasons in 2000-2002. Spectral indices of R_{RED}/R_{NIR} ratio, R_{GREEN}/R_{NIR} ratio, R_{RED}/R_{GREEN} ratio and normalized difference vegetation index (NDVI) were calculated from dynamic spectral characteristics GREEN, RED and NIR. Seasonal changes of the spectral characteristics, spectral indices, and growth parameters were either curvilinear or linear in both crops. It was found that growth parameters reached the maximum near heading when the vegetative growth climbed to the climax, and decreased after this stage when the plants grown toward maturity. Thus, modeling between spectral characteristics/indices and growth parameters may be improved by separating growing period into the pre-heading and post-heading phases. By the multiple linear regression (MLR) analysis, the best-2 or more variables MLR models were determined, which can be defined with an user-dependent coefficient of determination (R^2) for numbers of wavebands added to the models. The MLR models provided flexibility in choosing the individual narrow bands and improved the relationships to estimate plant growth.

Key words: Hyperspectral reflectance spectrum, Rice growth modeling, Multiple linear regression, Spectral characteristic, Spectral index.

水稻精準農業體系
由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量
25-34, 2003

由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量

陳榮坤*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: rkuen@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 26
一、前言 ---------- 26
二、方法簡述 ---------- 28
三、結果與討論 ---------- 29
四、結語 ---------- 31
五、誌謝 ---------- 32
六、引用文獻 ---------- 32
ABSTRACT ---------- 34

由植被高解析反射光譜模式化水稻之產量

陳榮坤*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: rkuen@wufeng.tari.gov.tw

摘要

爲利用光譜遙測技術具有之非破壞性而即時大面積快速偵測優點，必先瞭解被測物反射光譜特性及其外觀物理徵狀與光譜特徵之關係，同時建立對應之光譜特徵模式，才能據以進行監測而提供被測物的現況資訊。本研究以不等氮肥施用量處理來建構不同植被狀態及產量表現之水稻族群，以探討標準差植被指數(normalized difference vegetation index, NDVI；或稱正規差植生指數)、葉面積指數(leaf area index, LAI)及產量間的關係，試以利用植被高解析反射光譜模式化水稻的產量。試驗發現水稻全生育期的 NDVI 及 LAI 在不同年度和期作均呈現凸形曲線分佈，而 NDVI 與 LAI 之間則呈現指數曲線關係(R^2=0.601, $P<0.0001$)，顯示由 NDVI 及 LAI 相互推估的可行性。又比較抽穗期間量測的 LAI 與水稻產量之關係，發現水稻產量可利用抽穗期間的 LAI 予以預測，其中一期稻作爲抽穗前後 15 天之累加 LAI 或平均 LAI，二期作則爲抽穗前 15 天與抽穗後 10 天之累加 LAI 或平均 LAI。綜合本研究結果，顯示可藉由水稻生育期間光譜遙測資料計算的 NDVI 推估當時的 LAI，再以抽穗期間 LAI 進行對產量的預測，達到利用光譜遙測技術在追蹤水稻族群生長狀態及預測產量的目的。惟試驗亦發現，由於 NDVI 與 LAI 的指數關係，限制了在高 NDVI 臨界值的使用。

關鍵詞： 遙測、標準差植被指數、葉面積指數、產量、模式化。

一、前言

經過近三十年的長期研究，目前已可藉由光譜遙測技術進行對農作物生長發育的即時監測，藉由比較或分析作物植被反射光譜的光譜特徵變化，來辨識與判讀受測植被當時所處的狀態。此一光譜遙測技術的發展在農業上具有廣泛的應用潛力與價值，吾人可據以從事地面植被種類的探索，觀測作物相的分佈、作物種類占有的面積、植被覆蓋比率及生長狀態等，獲得作物生產過程中的各樣即時資訊。如此，非但有利於作物生產的規畫及經營管理，更提供予採行適當的因應措施與策略，達到穩定農作物生產及提升品質的目的。

自從 1972 年美國大地衛星 Landsat 發射升空以來，針對地表狀態進行的各種理論與實務的研究，即在世界各地蓬勃的進展。植被光譜分析技術亦隨著探討地表植被光學特性與植被狀態的關係，不斷的演進與改良，其中尤

以植被指數(vegetation index, VI；或稱植生指數)的光譜分析方法和應用最爲普遍。植被指數的邏輯係建立在光譜特徵與作物植被外觀物理徵狀存在的對應關係，將量測的植被光譜中篩選出少數幾個(通常爲 1-3 個)不同光譜特徵波段予以數學組合，以降低不確定的環境因素(如土壤背景、光源入射角或大氣干擾等)(Bouman, 1995)。通常這些特徵波段多以可見光(400-700 nm 或 400-740 nm)及近紅外光(700-1300 nm)範圍爲主，因爲作物植被在可見光波段反射的強弱反應了光合容量及光合活力大小，在近紅外光反射的多寡則對照出作物細胞活性、植被覆蓋率高低及幾何構造的複雜程度。因此高近紅外光反射比及低可見光反射比的反射光譜，代表該作物族群擁有較佳的綠色植被覆蓋率。自 1974 年 Rouse *et al.*提出以 NDVI 估測植體狀態的可行性後，標準差植被指數即成爲被廣泛使用於監測植被狀態的植被指數之一，其由紅光(R_{RED})及近紅外光(R_{NIR})二個窄波段所組成，計算公式爲(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})。當作物族群擁有較佳光合活力的綠色植被覆蓋率，NDVI 將趨近於 1，反之則趨近於 0(Rouse *el al.*, 1974)。由於植被指數的簡便計算方法，到目前爲止仍爲專家學者進行植被光譜研究時的常用指標或參考指數，研究指出其對於植體的活力、生質量、水分逆境、葉面積指數(leaf area index, LAI)及產量等(Bouman *et al.*, 1992; Clevers, 1989; Gong *et al.*, 1995; Holben *et al.*, 1980; Leblon *et al.*, 1991; Patel *et al.*, 1985; Wooten *et al.*, 1999)均有良好的相關性。然而，NDVI 仍然可能受到地面背景的干擾，如土壤水分含量的變化、化學物質的施用狀況或耕作環境的差異(Koller and Upadhyaya, 2001)等，故其應用有一定限制。

產量的估測與預測在農作物生產過程中是非常重要的，早期的產量預測具有期貨商品的經濟效益，也可以反饋調節當時作物生長狀態的經營管理，以增進農作生產的最大利益。後期的產量估測，可以讓生產者獲得未來實際產量的估值，也可以讓田間管理者評估栽培過程的良窳，作爲下期作改進的考量。無論是產量預測或估測資訊，均可提供政府擬訂及施行農業政策時的參考，並藉以調節市場供需而穩定農產品價格和維護農民權益。當然作物產量的預測或估測在實務上並非易事，因爲作物的生育表現隨環境變化而異，而且時間及空間的變異也必然帶來實測值與預測值之間的差異。更何況現行的農耕操作乃採行固定的栽培管理模式，未能依照農田各定點的變異實施差異性對應處理的精準管理作業，產量的空間變異分佈是可期的，甚至出現相當的差距。儘管如此，倘能建立機制式模式，以即時現況資訊作爲輸入減少環境變異的誤差，仍可能獲得客觀而令人接受的產量估測與預測值。

光譜遙測技術的發展，使得作物生長狀態得以即時獲知，並可據以建立具有理論邏輯基礎的光譜特徵模式，正好連接其中的斷層成爲後期估測與早期預測產量的有用工具。因此，許多專家學者致力於植被光譜與作物產量關係的研究，如 Ma *et al.* (1996)在探討植被光譜與玉米全生育期生植體乾物重及子實產量之間的關係時，發現玉米開花前的植被光譜對於田間綠色植體鮮重(biomass)及收穫時的子實產量呈現高度相關性，顯示利用玉米開花前的植被光譜於預測其子實產量的可行性。Gopalapillai *et al.* (1998)進一步指出，玉米種植後 75 天的植被光譜與氮肥施用量及產量具有高度相關，而且可以利用紅光波段的植被光譜反射率預測子實產量。Ma *et al.* (2001)在利用大豆生育初期(R2-R5)的植被反射光譜進行產量預測時，發現 NDVI 與大豆產量具有良好的相關性。

水稻是臺灣地區栽培面積最大、產值最高

的糧食作物，在水稻生產過程中，若能結合光譜遙測技術進行水稻族群生長狀態監測與產量估(預)測，將有助於降低生產成本及維持穩定的產量與品質。本研究於是在一、二期稻作栽培時，利用不等氮肥施用等級建構出水稻族群間的差異性，以取得廣大差異分佈的NDVI、LAI及稻穀產量資訊。除了建立NDVI與LAI間的關係模式，更藉由LAI與產量間的密切相關，使得吾人得以由NDVI間接推估水稻產量。再由尋找出估(預)測水稻產量的適當時期，達到利用光譜遙測技術即時估(預)測水稻產量的目的。

二、方法簡述

本研究於 2001-2002 年在臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場進行田間試驗，每年兩期作，共四期稻作，以提供作為LAI的取樣估算、近地面植被光譜量測及產量調查的水稻族群來源。參試水稻(*Oryza sativa*)品種為臺農 67 號，一期稻作分別施予 0、30、60、90、120、150 及 180 kg ha^{-1} 等七種不等氮肥施用等級，二期稻作則無 180 kg ha^{-1} 之氮肥施用等級。2001 年一期稻作在 2 月 27 日移植機插， 6 月 19 日收穫，生育日數共 113 天；二期稻作於 8 月 6 日移植機插，11 月 21 日收穫，生育日數為 108 天。2002 年一期作於 2 月 27 日移植機插，6 月 17 日收穫，生育日數共 111 天；二期作於 8 月 5 日移植機插，11 月 19 日收穫，生育日數為 107 天。試驗期間栽培方法採用慣行法，以南北向機械插秧，每叢 3-5 株，行株距約為 0.30 m × 0.15 m。農藥施用視病蟲草害發生狀況而定，除草劑部分係以 5%丁基拉草粒劑 30 kg ha^{-1} 於插秧一週內施用防除禾本科雜草，以 44.1%本達隆溶液 3 L ha^{-1} 劑量 200 倍稀釋液於移植後第三週防除鴨舌草及螢藺等雜草，再於插秧後約一個月實施人工除草一次。

為探討 LAI 對於預測稻穀產量的適當時期，於水稻全生育期間監測不同氮肥施用等級對於 LAI 的消長情形，自稻苗移植後約每隔一～二週取樣一次，至收穫為止。各小區取樣 6 叢稻株以估測 LAI，將每叢稻株綠色葉片剪下後，以面積測定儀(area meter; model LI-3000A, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)測定葉片表面積，再利用行株距換算為 LAI(每平方公尺土地面積上的葉片表面積，m^2 m^{-2})。收穫時於各小區收取 10 m^2 的稻株，以調查不等氮肥施用變級之稻穀產量。將各小區在水稻不同生育時期之 LAI、累加 LAI(accumulated LAI)及平均 LAI(mean LAI)對各小區之產量進行迴歸分析，以獲得決定係數(determining factor, R^2)。其中累加 LAI 及平均 LAI 分別是在某一段期間(20-40)天內，以水稻抽穗期為基準之不同天數組合的 LAI 累加量及 LAI 平均數值。

水稻族群植被反射光譜配合稻叢葉面積取樣約每隔一～二週測量一次，以田間攜帶式輻射光譜分析儀(spectroradiometer，model GER-2600，Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA)進行光輻射(radiance)測定。植被光譜反射比係由目標植被區之光輻射除以同波長之已知反射光譜特性的標準白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, U.S.A.)反射光輻射(即參考值)來計算。將光譜分析儀連接筆記型電腦，並藉由電腦中內建的 GER 程式(GER-2600 User Manual, 1996)進行植被反射光譜的量測操作。植被反射光譜量測波長範圍為 330-2600 nm，光輻射掃描器為 10 度視角(FOV)，固定於距離植被約 5.8 m 之高空作業車上垂直偵測反射光譜。每一塊田區逢機量測 15 定點，每一定點預設為 4 次掃描之平均值，取 15 定點均值為該區代表值。光輻射量測時間於上午十時至下午一時之間，選擇晴朗無雲時段偵測，

以減少太陽入射角及遮雲的干擾。由於稻株生育初期的植被尚未完全覆蓋地表，植被反射光譜將受到土壤及灌溉水影響，因此本研究僅使用未受水分及土表干擾的光譜曲線測點。

爲計算 NDVI，乃篩檢各氮肥變級的水稻族群植被反射光譜曲線的紅光波段(640-740 nm)谷點(RED)及近紅外光波段(740-1300 nm)頂點(NIR)反射比，以取得$(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$計算值在全生育期變化分佈。並對 NDVI 與 LAI 之間建立關係模式，期以利用 NDVI 估測 LAI。又如能合併不同期作資料建立適用於一、二期稻作的 NDVI 與 LAI 關係模式，將可提升此項關係模式的適用範圍，因此將兩期作的 NDVI 與 LAI 資料分別定義爲虛擬變數(dummy variable)檢定，以 SAS 8.2 進行不同期作迴歸曲線的差異性檢定，作爲不同期稻作間資料合併與否依據。

三、結果與討論

作物的生長發育主要受到其本身遺傳形質及栽培環境的影響，無論是遺傳形質或栽培環境的差異，均會造成植株生長不一及光合作用能力消長，最終表現在作物產量上。因此，利用光合作用容量(潛力)來評估單一品種的作物產量，是合適而有效率的方法之一。作物群落的單位土地面積光合作用量可以藉由單葉光合作用平均速率、LAI 及受光係數(extinction coefficient)等三個構成因子的乘積組成表示(Murata, 1975)，其中單葉光合作用平均速率及受光係數主要受遺傳因子的影響，而 LAI 受栽培環境的影響最大。因此，LAI 即成爲單一品種產量表現的主要因子，即反應環境對產量潛能影響的主要單一因子，這也是多數學術研究中經常使用 LAI 的原因。通常作物之 LAI 愈大，表示愈能有效利用光能進行光合產物的合成及累積，因而可預定較高的產量生成。然而，當 LAI 過大，導致葉面積過多、葉片相互遮陰時，將降低整體植株的光能擷取效率，進而影響同化物質的生產與累積。因此，LAI 與產量爲一曲線關係，將在 LAI 達到臨界高值後達到飽和，甚至由於維持呼吸的能量消耗而呈現下降趨勢。換言之，作物葉面積的增加相對於達到最大乾物質的累積速率有其最適 LAI(optimum leaf area index)，以收穫種子爲主的作物來說，其最適 LAI 約在 3～5 之間(Gardner *et al*., 1985)。

本研究以不等氮肥施用級差建構出不同 LAI 及產量的水稻族群，因而亦獲得變異分佈的 NDVI。LAI 及 NDVI 在二年四期稻作間的分佈如圖 1 所示，自插秧移植後隨著分櫱數增加及葉片伸展，使得 LAI 逐漸增加，約於抽穗前後達到最高值，之後隨著生育進展及老化過程而漸趨下降，在全生育期間呈現凸形曲線。NDVI 的表現類似於 LAI，一如稻株的生育及植被覆蓋的變化，亦呈現凸形曲線趨勢。由圖 1 發現，無論是一期稻作或二期稻作，氮肥施用量愈高則 LAI 及 NDVI 值愈大。惟在相同氮肥施用等級之下，一期稻作的 LAI 及 NDVI 在不同栽培年度間均高於二期作，顯示兩期稻作受到不同的環境影響，亦反映出一、二期稻作在環境上的差異。Houng(1979)曾指出，水稻不同期作間的氮素吸收速率並無顯著差異，然而在相同的田間管理措施下，二期稻作顯然受到氣候環境的影響而造成較低的 LAI。經過許多專家學者的長期研究，如今已知道臺灣的二期稻作生育初期高溫環境是造成稻株分蘗能力受到抑制的原因，並將因促進稻株快速生長而縮短營養生長期(Lin, 1979)。由於 LAI 與分蘗數爲正比關係，因而造成二期稻作呈現較低的 LAI，以及較低的 NDVI。

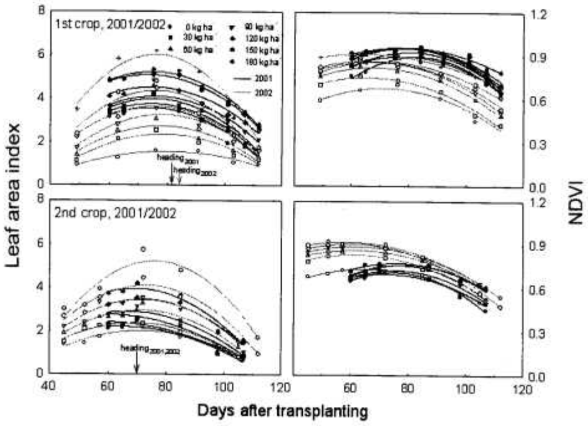


圖 1. 2001-2002 **年水稻不同期作之** LAI **與** NDVI **在全生育期間的分佈。**

Fig. 1. Changes of leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI) as a function of time after transplanting for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

LAI 及 NDVI 的關係，可以由各年度不同期作的 LAI 與 NDVI 關係圖的繪製呈現(圖 2)。可以明顯看出，LAI 及 NDVI 在不同期作之間均呈現指數型曲線關係，此結果與 Yang *et al.* (1999)的報告相似。爲增加 LAI 及 NDVI 關係模式在不同期作間的適用性，再利用虛擬變數進行兩期稻作間關係曲線的差異性檢定，發現 LAI 及 NDVI 的關係模式並未因期作別而有顯著差異，乃進而合併不同期作資料以得到同時適用於兩期稻作的迴歸模式，其決定係數(R^2)大於 0.6 ($P<0.0001$)，顯示 NDVI 及 LAI 互爲良好的預測性能。Gong *et al.*(1995)研究指出，在許多作物中 NDVI 是 LAI 的適用指標，而且可以據以 NDVI 推估 LAI。Aman *et al.*(1992)的報告也指出 NDVI 可對 LAI 進行良好的預測，在 LAI＜3 時，NDVI 與 LAI 幾乎呈現正直線關係。因此，本研究中 NDVI 及 LAI 在水稻全生育期間伴隨改變是合理的結果，惟在高 LAI 數值 NDVI 的反應將變得遲頓，顯示當 LAI 達到臨界高值後將造成 NDVI 的飽和。因此，在應用 LAI 和 NDVI 之間的關係模式時，必須注意 LAI 的臨界飽和點，以及採用之 NDVI 極限值。

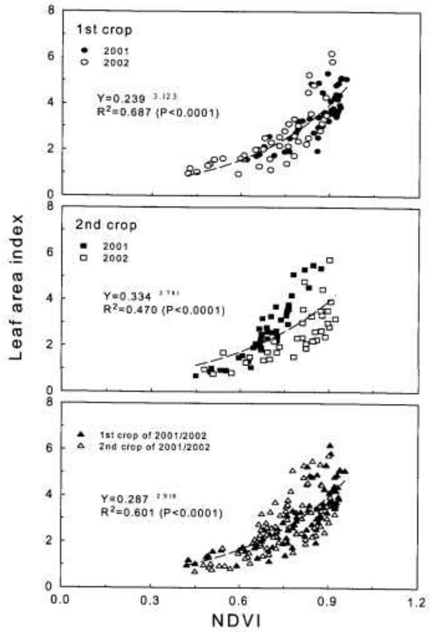


圖 2. 2001-2002 **年水稻不同期作之** LAI **與** NDVI **的關係。**

Fig. 2. The exponential relationships between leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

進一步將二年四期稻作的 LAI 及 NDVI 變化範圍分析於表 1，顯示水稻族群最大 LAI 值約介於 5.5-6.2 之間，而最大 NDVI 約在 0.89-0.93 的範圍內。此外，在一期稻作中，2001 年的最大 LAI 值爲 5.6，低於 2002 年的 LAI(6.2)，但其對應之 NDVI 值(0.93)卻高於 2002 年的 0.91，顯示 NDVI 與 LAI 之間的關係似乎仍然受到環境的影響而出現差異，並非是固定的比例關係。環境的影響因素可能是氣象因子，也可能是病蟲害，尤其當病蟲源造成葉片顯現部分黃化或斑點時，雖然不影響 LAI 的調查，卻可能反應於 NDVI 的量測而產生落差。Sellers(1985)曾指出，NDVI 雖然對於作物的光合作用能力具有線性關係，卻非 LAI 與生質量的良好估測指標。所以，LAI 與 NDVI

的關係可能因作物種類而異，亦可能受到環境的影響而有所差別(Baret and Guyot, 1991; Best and Harlan, 1985; Wanjura and Hatfield, 1987)。

表 1. 2001-2002 **年水稻不同期作生育期間** LAI **與** NDVI **之極小及極大值**。

Table 1. The minimum and maximum values of leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

Cropping season	Minimum LAI	Maximum LAI	Minimum NDVI	Maximum NDVI
First Crops				
2001	1.6	5.6	0.61	0.93
2002	0.9	6.2	0.42	0.91
Second Crop				
2001	0.6	5.5	0.45	0.89
2002	0.8	5.7	0.51	0.92

爲瞭解水稻族群 LAI 與產量間的關係，利用不等氮肥施用變級之全生育期模式化 LAI 值與產量進行相關分析，結果如圖 3 所示。研究顯示在水稻不同年度及期作間，LAI 與產量在全生育期間的相關性(R^2)均在 0.73 以上。不同年度及期作間仍可顯現出相關性的高低差異，尤以 2001 年一期稻作的相關性最低，可能與氣候環境或病蟲草害的影響有關，尙待查證。Shieh (1978)曾指出，LAI 對於水稻產量及抽穗時的植株全乾物重呈現正比關係，其抽穗前與抽穗後到稻穀黃熟期之間的光合作用量，是支配乾物質生產及穀實產量的最重要因素，且抽穗後 LAI 的維持時間，即葉面積持續期(leaf area duration)愈大，愈有利於產量的提升。因此，爲定義出 LAI 對產量預測的適當時段，以水稻抽穗期爲基準，利用不同天數組合(20-40 天)的模式化 LAI 累加量及 LAI 平均數値對於產量進行相關性分析(結果未列出)。結果發現利用水稻 LAI 預測產量的適當時期，在一期作爲抽穗前後 15 天的累加 LAI(R^2=0.84-0.96) 或平均 LAI(R^2=0.85-0.97)，二期作爲抽穗前 15 天至抽穗後 10 天的累加 LAI(R^2=0.93-0.98) 或平均 LAI (R^2=0.93-0.99)。顯示無論在一期稻作或二期稻作，水稻產量均可藉由抽穗期間的 LAI 值進行估測。惟欲獲得準確估值，仍須考量氣候環境對作物生產的影響，加入影響參數才能提高估測準確性。

四、結語

綜合本研究結果顯示，當建立水稻族群植被之 NDVI 與 LAI 的關係模式後，即可藉由模式相互推估兩項參數的估値，因而瞭解 LAI 的變化對 NDVI 的影響，以及由 NDVI 去追蹤 LAI 的改變。而當完成解析 LAI 與產量的關係後，則可利用 NDVI 經由對 LAI 的估算來預測未來的水稻產量，如此即可進行破壞性的大面積快速產量預測工作。這些資訊的綜合運用並得以提供資訊予生產者和田間管理者，使之瞭解栽培作物的生長現況，據以實施適當的管理措施，獲得農作生產的最大利益。然而，由於 NDVI 與 LAI 爲指數形曲線關係，受到迴歸模式中飽和度問題的限制，對於 NDVI 的使用應該謹愼。在未來的研究中，作者將在 NDVI、LAI 及產量間的相互關係中，增加不同期作、年度及栽培地區的資料，以提升預測模式對於不同栽培環境的適用廣度。

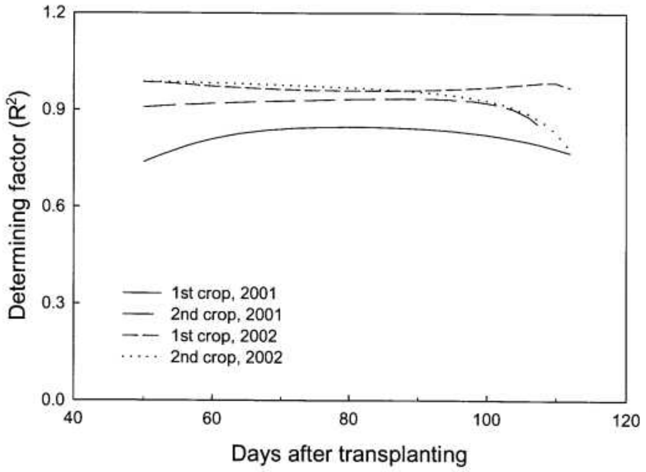


圖3. 2001-2002年水稻不同期作之LAI與產量的關係。

Fig. 3. Changes of the determining factor for the relationships between grain yield and LAI for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons of 2001 and 2002.

五、誌謝

本項研究承蒙行政院農業委員會農業試驗所經費(89 遙測-4.1-糧-41(Z), 90 農科-4.1.1-農-C2(Z), 91 農科-5.1.3-農-C2(Z), 92 農科-1.1.6-農 C1(Z))支持，謹藉以表示由衷感謝。

六、引用文獻

Aman, A., H.P. Randriamanantena, A. Podaire and R. Forouin. 1992. Upscale Integration of Normalized Difference Vegetation Index: The problem of spatial heterogeneity. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30:326-338.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-173.

Best, R.G. and J.C. Harlan. 1985. Spectral estimation of green leaf area index of oats. Remote Sens. Environ. 17:27-36.

Bouman, B.A.M. 1995. Crop modeling and remote sensing for yield prediction. Netherlands J. Agric. Sci. 43:413-161.

Bouman, B.A.M., H.W.J. van Kasteren and D. Uenk. 1992. Standard relations to estimate ground cover and LAI of agricultural crops from reflectance measurements. Eur. J. Agric. 1:249-262.

Clevers, J.P.G.W. 1989. The application of a weighted infrared vegetation index for estimating leaf area index by correcting soil moisture. Remote Sens. Environ. 29:25-37.

Gardner, F.P., R.B. Pearce and R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. p.204. Iowa State University Press, U.S.A.

Gong, P., P. Ruiliang and J.R. Miller. 1995. Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data. PE&RS. 61(9):1107-1117.

Gopalapillai, S., L. Tian and J. Beal. 1998. Detection of nitrogen stress in corn using digital aerial imaging. ASAE Paper No. 983030. St. Joseph, Mich., ASAE.

Holben, B.N., C.J. Tucker and C.J. Fan. 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. Photogramm. eng. remote sensing. 46:651-656.

Houng K. H. 1979. Efficiency of nitrogen fertilization on the yield of the first and second rice crops. (in Chinese) p.133-140. *In*:Proceedings of the Symposium on the Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement. Held at Taiwan Agricultural Research Institute on 7-8 June 1978. Published by National Science Council, Taipei.

Koller, M. and S.K. Upadhyaya. 2001. Relationship between a soil adjusted vegetation index and processing tomato yield. Proceedings of 2001 ASAE Annual Meeting, Paper No.011143. St. Joseph, MI, USA.

Leblon, B., M. Guerif and F. Baret. 1991. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice. Remote Sens. Environ. 38:147-158.

Lin A.C. 1979. Comparison on the photosynthesis under community conditions between the first and second crops of rice. (in Chinese) p.85-90. *In*:Proceedings of the Symposium on the Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement. Held at Taiwan Agricultural Research Institute on 7-8 June 1978. Published by National Science Council, Taipei.

Ma, B.L., L.M. Dwyer, C. Costa, E.R. Cober and M.J. Morrison. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. Agron. J. 93:1227-1234.

Ma, B.L., M.J. Morrison and L.M. Dwyer. 1996. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. Agronomy J. 88(6):915-920.

Murata, Y. 1975. The effect of solar radiation, temperature and aging on net assimilation rate of crop stands-from analysis of the "Maximal Growth Rate Experiment" of IBP/PP. Proc. Crop. Sci. Soc. Japan. 44:153-159.

Patel, N.K., T.P. Singh, B. Sahai and M.S. Patel. 1985. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. Intl. J. Remote Sens. 6:657-664.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradition (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1-371.

SAS Institute. 1998. SAS/STAT user's guide. Version 8.1. SAS Inst., Cary, NC, USA.

Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. Intl. J. Remote Sens. 6(8):1335-1372.

Shieh, Y.J. 1978. Growth and community photosynthesis of rice plants in the first and second crop seasons. (in Chinese) p.91-100. *In*:Proceedings of the Symposium on the Causes of Low Yield of the Second Crop Rice in Taiwan and the Measures for Improvement. Held at Taiwan Agricultural Research Institute on 7-8 June 1978. Published by National Science Council, Taipei.

Wanjura, D.F., and J.L. Hatfield. 1987. Sensitivity of spectral vegetation indices to crop biomass. Trans. ASAE 30:810-816.

Wooten, J.R., D.C. Akins, J.A. Thomasson, S.A. Shearer and D.A. Pennington. 1999. Satellite imagery for crop stress and yield prediction: cotton in Mississippi. ASAE Paper No. 991133. St. Joseph, MI, USA.

Yang, C.M. and M.R. Su. 1999. Modeling rice growth from characteristics of reflectance spectra. p.735-740. *In*:Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing. 22-25 November 1999, Hong Kong.

Modeling Rice Yield Using Hyperspectral Reflectance Data

Rong-Kuen Chen* and Chwen-Ming Yang
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung,Taiwan, ROC
E-mail: rkuen@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

The optical properties of target canopy and the relationships between spectral characteristics and biophysical characters of crop should be clarified and well defined before using the advantages of spectral remote sensing to nondestructively detect and monitoring the timely information of growth status over large area. This study used different nitrogen fertilizer application rates to establish varied canopy status and yield performance so as to investigate the relations among normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI) and rice yield, and to modeling rice yield from ground-based remotely sensed hyperspectral reflectance data. It showed that changes of NDVI and LAI during the growing periods of rice, both in the first cropping and the second cropping seasons, were a sigmoidal pattern with the maximum observed near heading. The relationship between NDVI and LAI was fitted to an exponential function (R^2=0.601, P<0.0001), indicating that NDVI and LAI may be mutually estimated. By comparing the values of LAI before and after heading with yields at harvest, it was found that rice yield may be assessed from LAI near heading. For the first crops. the mean and the accumulated LAI from 15 days before heading to 15 days after heading were closely correlated to yield. It was the mean and the accumulated LAI from 15 days before heading to 10 days after heading showing close relation to yield for the second crops. Results from this study suggest that NDVI calculated from reflectance spectra measured during rice growth may be used to estimate LAI, which collect near heading may then be used to predict yield at harvest. However, the exponential function of NDVI and LAI limits the application of these two parameters in the upper end of the curve where the 'saturation effects' occur and NDVI was insensitive to change of LAI.

Key wrods: Remote sensing, Normalized difference vegetation index, Leaf area index, Yield, Modeling.

由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量

張芳銘[*]、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: fming@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 36
一、前言 ---------- 36
二、方法簡述 ---------- 37
三、結果與討論 ---------- 38
四、結語 ---------- 40
五、誌謝 ---------- 41
六、引用文獻 ---------- 41
ABSTRACT ---------- 42

由植被高解析反射光譜模式化稻株之氮素含量

張芳銘*、楊純明
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: fming@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本研究量測的水稻植被反射光譜具有一般綠色植物光譜曲線的類似特性，而不等量氮肥的施用將改變水稻的植被光譜曲線；稻株葉片及稈的含氮量百分比在生育期間的改變，無論一、二期稻作，均隨著生育的進展出現下降的趨勢。本研究發現，葉片氮素含量與稈氮素含量的相關強度曲線變化雷同，顯示各窄波段反射比對於葉片及稈的氮素含量具有相似的敏感反應，然而一期稻作與二期稻作的相關強度表現卻不一致。整體來說，一期稻作的反射光譜各窄波段反射比與氮素含量的相關性不高，相關係數介於-0.5 至 0.5 之間；二期稻作則在近紅外光區至中紅外光區具有較大的相關性，尤其在 1607 nm 窄波段位置的相關係數之絕對值最大，可獲得近 75%的變異估測準確度。經比較各種特徵波段之反射比值組合及光譜特徵與氮素含量的關係，發現仍以二期稻作才出現顯著相關，在 red edge slope 爲二次曲線關係，在 red edge span/red edge location 則爲一次直線關係。又根據研究結果，一、二期稻作均可利用多元線性複迴歸模式估測葉片及稈的氮素狀態，其中適用於一期稻作全生育期的植株葉片及稈氮素含量估測的最佳三元(403 nm、505 nm 及 710 nm)直線複迴歸模式決定係數(R^2)分別可達 0.734 及 0.717($P<0.0001$)，二期稻作相對的最佳三元(403 nm、558 nm 及 1607 nm)直線複迴歸模式決定係數則分別可達 0.814 及 0.812($P<0.0001$)。經比較這些三元直線複迴歸模式的估測值與實測值後，發現相關係數大於 0.93，顯示無論葉片或稈的氮素含量，模式估測可達近於 1：1 的驗證結果。

關鍵詞：光譜特徵、稻株氮素含量、植被反射比光譜、相關係數、多元直線複迴歸。

一、前言

眾所周知氮素是構成細胞原生質蛋白的主要成分之一，並爲許多酵素的組成元素，參與維繫生存與生活功能的各項生理生化反應。植物在生長的過程當中，必須不斷的吸收與利用氮素來生成各種含氮化合物，推動代謝機制的進行，促使細胞持續的分裂、擴大與繁殖並組合成爲組織、器官，再由營養生長轉進至生殖生長而代代生生循環不息，氮素的重要性不言可喻。

然而，當植體吸收蓄積了過量的氮素時，可能導致莖葉過度茂密因而影響透光係數，並使植體趨於柔弱纖細而易於受到病蟲源的危害。前者大幅增加的營養器官將增長能量的呼

吸消耗，破壞光合作用與呼吸作用的動態平衡，也使入射光源在植叢內快速衰減，限制了整體光合容量的發揮，以致於反而造成乾物質生成減少的後果及延遲植株的成熟（朱，1988；吳及林，1968；蔡及陳，1966）。後者係因吸收的過量氨離子降低了碳氮比，無法滿足植體內蛋白質合成所需的適當氮、碳比例，在醣類所形成的有機酸相對不足之下，使得多餘的氮素以氨基酸或醯氨形態儲積於植體內(湯及侯，1969)，在此情形極易受到病蟲源的侵襲(如稻株的稻熱病及二化螟蟲危害即是)，也可能帶來過多游離氨離子的毒害。另一方面，倘若植物缺乏氮素，將直接影響植株的生長與發育。以水稻言之，在有效分蘗期間氮素供應不足時，將因減少分蘗數而使穗數下降；在幼穗形成至孕穗期間欠缺氮素時，則減少穗軸分枝及每穗穎花數，嚴重影響生產潛力(朱，1988；吳及林，1968；蔡，1976)。

由於水稻是臺灣地區栽培面積最廣而產值最大的農作物，米食亦為民眾的傳統主食，如何實施精準的肥料管理，以適時適量的施用氮肥，仍為現行栽培水稻的重點課題。氮肥的精準管理不但可以提高稻作生產及施肥的經濟效益，更可以減少非點源污染，而具有維護生態環境的積極意義（李等，2002；Yang, 2001）。惟在水稻生育前期不易以目視方法判別稻株的氮營養狀況，即便以肉眼主觀的判斷決定施肥量，也難以依照稻株需求均勻合宜的施用於稻田中。本研究採用光譜遙測技術偵測近地面水稻族群植被高解析反射光譜，篩檢與稻株氮素含量相關的光譜特徵，以建立估測氮素含量的光譜特徵模式。

二、方法簡述

本研究於 2000-2002 年在臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場(24°02'N, 120°42'E, 海拔高度 85 m)進行田間試驗，參試水稻品種為臺農 67 號（*Oryza sativa* L. cv. TNG 67），計有 2000 年二期稻作、2001 年一期稻作、二期稻作及 2002 年一期稻作等四個期作。田區面積為 0.3 公頃，土壤屬於 Fluvaquentic Dystrochrept，酸鹼值為 pH 5.17，有機質含量為 1.22%。將田區劃分為六等份小區，每小區長 50 m、寬 10 m，由東往西依序施用 0、30、60、90、120 及 150 kg N ha^{-1} 等六種不等氮肥(硫銨)等級。各氮肥變級均分成三等份施用，於插秧後一週內施用 1/3 量當做基肥，插秧後 4(二期作)或 6(一期作)週施用 1/3 量當做第一次追肥，抽穗前三週施用剩餘的 1/3 當做第二次追肥(或稱穗肥)。試驗期間的水稻栽培方法採用慣行法，秧苗以南北座向機械插秧，每叢 3-5 株，行株距約為 0.30 m × 0.15 m，形成的族群密度約為 185,000 hills ha^{-1}。農藥施用視病蟲草害發生狀況而定，依前臺灣省政府農林廳出版之植物保護手冊(1994)推薦用藥及用量操作。

水稻植被光譜的量測係利用田間攜帶式高解析輻射光譜儀（spectroradiometer，model GER-2600, Geophysical & Environmental Research Crop., New York, USA）進行對反射光輻射的測定，量測波長範圍 330-2600 nm。光譜儀裝置 10 度視角(field-of-view)掃描鏡頭，分別與電池及手提電腦相接來操作。將光譜儀及各組件固定於距離水稻植被約 5.8 m 之高空作業車上垂直進行近地面量測，光譜測定圓周面積(目標區)約為 1 m 直徑。量測的光譜範圍各窄波段的光輻射值，配合已知反射光譜特性的參考白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, USA)光輻射資料計算出反射比光譜。每一氮肥處理區皆逢機量測 15 目標區，以平均值光譜曲線為代表，且將高解析光譜之各窄波段中心值取至個位數，又僅選用 350-2400 n m波長範圍的反射比光譜以去除光

譜兩端的硬體電磁干擾。光譜量測時間選擇在10:00 至 13:00 時段的晴朗區間操作，以減少太陽入射角及雲遮的干擾，自插秧後 4-5 週起定期的量測光譜，以避免植被反射光譜受到土壤及灌溉水的影響。試驗統計分析係由 Statistical Analysis System version 8.1 軟體(SAS 1998)及 SigmaPlot 2000 統計繪圖軟體(SPSS ASC BV, The Netherlands)進行資料處理。

水稻植被高解析反射光譜之曲線光譜特徵波段之篩檢，係選取各代表曲線之綠光波段之最高反射比位置(GREEN)、紅光波段之最低反射比位置(RED)及近紅外光波段之最大反射比位置(NIR)，均爲動態選取之特定波長位置。計算此三特徵波段反射比之相互比值、差值及和值，並以計算 NDVI($(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$)，以分析這些光譜指數與稻株葉片及稈(shoot, 莖+葉+葉鞘)氮素含量的關係。另篩檢介於 RED 與 NIR 之間的紅光臨界位置(red edge location)及反射比變動之紅光臨界區間(red edge span)，且計算紅光臨界之斜率(red edge slope)，以瞭解其等與氮素含量的關係。爲篩檢水稻反射光譜範圍內之窄波段反射比與氮素含量相關性最大的波段位置，乃進行簡單直線相關強度分析（correlation intensity analysis），比較是否可作爲估測稻株葉片或稈之氮素含量光譜特徵波段。再由相關強度分析所主觀選取的不同波段，篩檢出不同的轉折窄波段位置，以 SAS 統計軟體的共線性診斷 (collinearity diagnostics)、R^2 Selection methods 及逐步迴歸分析(step-wise regression analysis)選取若干與氮素含量有關的特徵窄波段，並由決定係數(coefficient of determination or determining factor)的選定建立多元線性複迴歸模式。

氮素之化學分析係配合光譜量測及取樣調查，將樣株取回依各部位稱取鮮重後，經70℃烘乾 72 小時後，磨碎篩濾（0.1 mm）粉狀樣本。以修正的 Kjeldahl 方法分析樣本全氮含量(李等，2002)。

三、結果與討論

作(植)物植被的色澤、組織結構、組成分及生理代謝的現況表現，將影響其反射光譜特性，而族群幾何構造及周遭環境隨著時空的變異，亦將反應在反射光譜質與量上的變化。一般綠色植物的健康植株，因爲含有豐富的葉綠體(素)及其他色素（包括胡蘿蔔素、花青素及葉黃素等），因此在可見光區(400-700 nm 或 400-740 nm)有超過 80%的吸收率；由於色素與細胞壁在近紅外光區(740-1300 nm)幾乎不吸收，因此植被的反射光譜在近紅外光區會出現一個反射高峰區(Blackmer *et al.,* 1996; Gausman, 1982; Gausman *et al*., 1969; Sinclair, 1971)。又由於葉綠素 a 及葉綠素 b 的主要吸收峰是位於可見光區的藍光波段及紅光波段，分別以 450 nm 及 670 nm 爲中心，所以植被約在 550 nm 附近會有較強的反射值(Arnon, 1949; 陳等，2001; 楊及蘇，1997)。本研究量測的水稻植被反射光譜具有以上所述綠色植物的類似現象(資料未列出)。

本研究亦發現，將不等量的氮肥施用於田間將改變水稻的植被光譜曲線(資料未列出)，高氮肥用量所促進的高植被覆蓋，使其在可見光區因高昂的光合作用而具有較低的反射比，而在近紅外光區則因複雜植叢的多重反射與折射作用而具有較高的反射比。文獻報告也顯示，缺乏氮素的作物植被在可見光區的反射會因爲葉綠素濃度的降低而增加，在近紅外光區的反射卻因爲葉片細胞層數的減少而降低，使得近紅外光波段的變化可作爲作物植株氮素狀態的初步判斷(Baret and Guyot, 1991; Guyot, 1990; Hergert and Ferguson, 1997;

Milton *et al*., 1991; Sinclair, 1971)。本研究之稻株葉片及稈的含氮量百分比在生育期間的改變，無論一、二期稻作，均隨著生育的進展出現下降的趨勢(資料未列出)。顯示就稻株的單位重量而言，氮素含量隨株齡的增加而減少。生育前期可視爲發展營養器官(如葉、莖)的容積導致濃渡的減少，生育後期則分別有轉移至生殖器官(如穗)及老化組織枯萎掉落等可能性。

在量測的水稻植被光譜範圍內(350-2400 nm)，各窄波段之反射比與稻株葉片及稈的含氮量關係，可利用簡單直線相關強度分析，而得以初步瞭解稻株全生育期間各窄波段與氮素含量的相關強度。本研究發現，葉片氮素含量與稈氮素含量的相關強度曲線變化雷同(資料未列出)，顯示各窄波段反射比對於葉片及稈的氮素含量具有相似的敏感反應，然而一期稻作與二期稻作的相關強度表現卻不一致。整體來說，一期稻作的反射光譜各窄波段反射比與氮素含量的相關性不高，相關係數介於-0.5 至 0.5 之間；二期稻作則在近紅外光區至中紅外光區具有較大的相關性，尤其在 1607 nm 窄波段位置的相關係數之絕對值最大。經將 1607 nm 窄波段位置的反射比與稻株葉片及稈的氮素含量關係予以繪圖，顯示水稻生育期間此一窄波段反射比與氮素含量適用於二次曲線關係(圖 1)，反射比愈高則氮素含量愈低，決定係數(R^2)在葉片及稈分別達到 0.763、0.745 (P<0.0001)。因此，若欲以單一窄波段反射比估測與追蹤二期稻作的植株氮素含量，可選取 1607 nm 窄波段，獲得近 75%的變異估測準確度。

由於綠色植物之植被對可見光區，尤其是紅光波段(640-740 nm)及藍光波段(425-490 nm)，具有較大的光輻射利用而形成較小的反射，而對近紅外光區(740-1300 nm)因受到細胞壁及細胞內氣體的反射形成較大的反射，本研究乃自水稻反射光譜曲線中動態篩檢出綠光波段峰點、紅光波段谷點及近紅外光波段頂點，作爲三項光譜曲線特徵波段，並由之劃分出紅光臨界區間(red edge span)、紅光臨界位置(red edge location)及紅光臨界斜率(red edge slope)等三項光譜特徵。經比較各種特徵波段之反射比值組合及光譜特徵與氮素含量的關係，發現仍以二期稻作才出現顯著相關，在 red edge slope 爲二次曲線關係，在 red edge span/red edge location 則爲一次直線關係(圖 2)。由於二次曲線明顯的在曲線高值臨界出現含氮量的飽和現象，不適用作爲對氮素含量的估測，建議以一次直線關係的 red edge span/red edge location 當做參數。一期稻作期間，各項特徵波段反射比組合及光譜特徵與氮素含量的關係並不高(資料未列出)，所以未予進一步分析及說明，未來加上更多年期資料後再予探討。

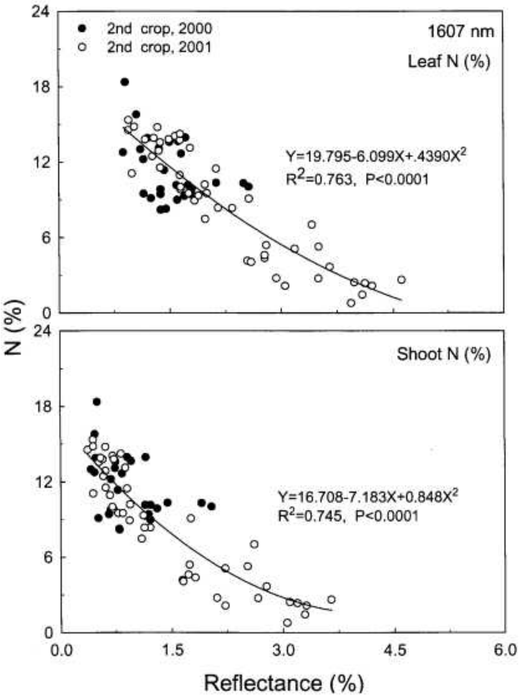


Fig. 1. Changes of nitrogen contents in leaves and shoots to spectral reflectance at 1607 nm for rice plants grown in the second cropping seasons of 2000 and 2001.

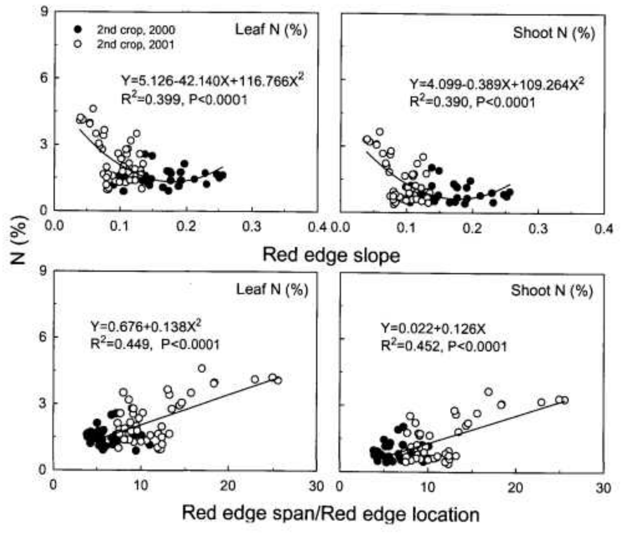


Fig. 2. Correlation between nitrogen contents in leaves and shoots and the red edge slope and red edge span/Red edge location for rice plants grown in the second cropping seasons of 2000 and 2001.

本研究再利用複迴歸分析方法，篩檢出更多的光譜特徵波段，期以組合複迴歸模式來提高對氮素含量的估測。經由 SAS 的共線性診斷(collinearity diagnostics)及逐步迴歸分析(step-wise regression analysis)步驟，篩檢出氮素含量有關之多個特徵窄波段，建立多元線性複迴歸模式。續由選取特徵窄波段數目所提高的模式決定係數，主觀的決定適合對稻株葉片及稈氮素含量的多元線性複迴歸模式。根據研究結果，一、二期稻作均可利用多元線性複迴歸模式估測葉片及稈的氮素狀態，其中適用於一期稻作全生育期的植株葉片及稈氮素含量估測的最佳三元(403 nm、505 nm 及 710 nm)直線複迴歸模式決定係數(R^2)分別可達 0.734 及 0.717($P<0.0001$)，二期稻作相對的最佳三元(403 nm、558 nm 及 1607 nm)直線複迴歸模式決定係數則分別可達 0.814 及 0.812($P<0.0001$)。經比較這些三元直線複迴歸模式的估測值與實測值後，發現相關係數大於 0.93，而預測的標準誤差值(SEP, standard error of prediction)小於 0.583(圖 3)。此顯示無論葉片或稈的氮素含量，模式估測可達近於 1：1 的驗證結果。

四、結語

由本文研究結果，顯示藉由簡單直線相關強度分析，可以篩檢出與稻株氮素含量相關性最高的光譜特徵波段。又由光譜指數及光譜特徵的分析與比較，可以找出適用的指數及光譜特徵。再藉由多元線性複迴歸模式，涵蓋多個特徵窄波段，確實增進了對稻株氮素狀態的估測準確度，也提高了利用於估測及追蹤稻株氮素狀態的可行性。如此結果，亦將使得利用光譜遙測模式從事稻株氮素含量及氮肥施用的精準管理更有機會加以落實。然而，為了增進對不同環境的適用性，建議宜增加更多環境條件的量測資料，並找出更適當的光譜特徵波段及數目，使建立的光譜遙測模式更能掌握氮素含量的變異。

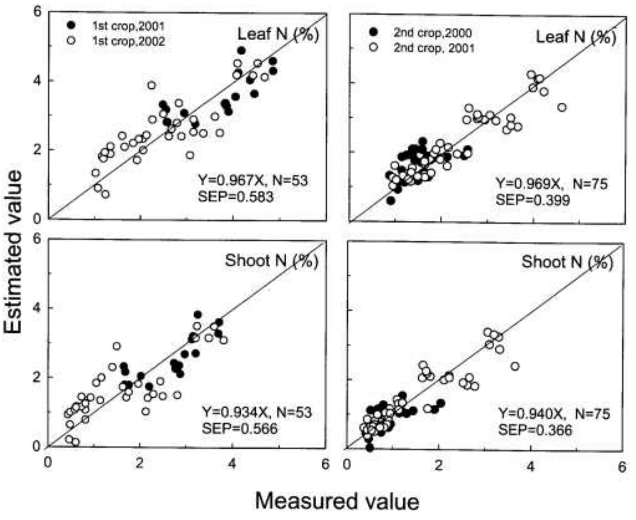


Fig. 3. Comparisons between the estimated values for the multiple linear regression models and the measured values of nitrogen contents in leaves and shoots for rice plants grown in the cropping seasons of 2000-2002.

五、誌謝

本研究承蒙行政院農業委員會農業試驗所經費(89 遙測-4.1-糧-41(Z), 90 農科-4.1.1-農-C2(Z), 91 農科-5.1.3-農-C2(Z), 92 農科-1.1.6-農 C1(Z))支持，謹藉以表示由衷感謝。

六、引用文獻

朱德民。1988。作物生產過程。國立中興大學，臺中市。

李裕娟、楊純明、張愛華。2002。施用氮肥對水稻植株氮素、葉綠素及植冠反射光譜之影響。中華農業研究 51（1）: 1-14。

吳育郎、林富雄。1968。水稻品種特性與肥料反應。科學農業 16（9-10）: 251-254。

陳榮坤、楊純明、張芳銘、蘇慕容。2001。水稻不同期作植被反射光譜之動態分析。中華農業氣象 8:77-92。

湯文通、侯愉。1969。水稻之生長原理（4）。科學農業 17（7,8）: 235-240。

楊純明、蘇慕容。1997。水稻族群植被反射光譜之分析。中華農業氣象 4（2）: 87-95。

蔡文福、陳炯崧。1966。水稻幼穗形成期及齊穗期施用氮肥對收量及其構成因素之影響。科學農業 14（1-2）: 53-54。

Arnon, D. I. 1949. Copper Enzymes in isolated chloroplasts : Polyphenoloxidases in *Beta vulgaris.* Plant Physiol. 24:1-15.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-173

Blackmer, A. M. 1988. Using precision farming technologies to improve management of soil and fertilizer nitrogen. Australian J. Agric. Sci. 49:555-564.

Gausman, H.W. 1982 Visible light reflectance and absorptance of differently pigmented cotton leaves. Remote Sens. Environ. 13:233-238.

Gausman, H. W., W.A. Allen, V.I. Myers and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hissutum* L. Agron. J. 61:374-376.

Guyot, G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. p.19-43. *In:* Applications of Remote Sensing in Agriculture. Steven, M. D. and J.A. Clark, eds. Butterworth, London.

Hergert, G.W. and R.B. Ferguson. 1997. The impact of variable rate N application on N use efficiency of furrow irrigated Maize. p.297-305. *In*: Precision Agriculture. J.V. Stafford, ed., BIOS Scienttific Publishers Ltd., Oxford, U.K.

Milton, N. M., B.A. Eiswerth and C.M. Ager. 1991. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. Remote Sens. Environ. 61:319-345.

Sinclair, T.R., R.M. Hoffer and M.M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. Agron. J. 63:864-868.

Yang, C.-M. 2001. Estimation of Leaf Nitrogen Content from Spectral Characteristics of Rice Canopy. Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection. Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. 14-18 October, 2001. Potomac, Maryland, USA. The ScientificWorld 1(S2). ISSN 1532-2246; DOI 10. 1100/tsw2001.387.

Using Hyperspectral Reflectance Data to Estimate Nitrogen in Rice Plants

Fan-Ming Chang* and Chwen-Ming Yang
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail: fming@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Results indicated that reflectance spectra of rice canopy were similar to other green-like plants. Applications of different amounts of nitrogen fertilizer changed the spectral patterns, but did not changed the decreasing trend of nitrogen contents in leaves and shoots of rice following plant development in both cropping seasons. Correlation intensity curve between spectral reflectance and nitrogen content in 340-2400 nm was similar in leaves and shoots, suggesting that responses of reflectance of rice spectrum to nitrogen contents in leaves and shoots were quite alike. However, the correlation intensity curve of First Crops was not conformed to that of Second Crops. In general, change of correlation coefficient was in between –0.5 and 0.5 in First Crops, yet the values were much higher in Second Crops. At 1607 nm for Second Crops, spectral reflectance may estimate more than 75% variability of nitrogen contents in leaves and shoots. Among the tested spectral indices and spectral characteristics, only red edge slope and red edge span/red edge location ratio had close correlation with nitrogen content in the second cropping season. The red edge slope was fitted to a quadratic function while red edge span/red edge location ratio was fitted to a linear function. Results also indicated that estimation of nitrogen content in leaves and shoots of rice plants may be improved by using multiple linear regression (MLR) models. The correlation coefficients for the relationships between the estimated and the measured values of nitrogen contents were greater than 0.93. The spectral wavebands suitable for the best-3 MLR models were 403 nm, 505 nm and 710 nm for First Crops and were 403 nm, 558 nm and 1607 nm for Second Crops, respectively.

Key words: Spectral characteristics, Nitrogen content in rice, Canopy reflectance spectrum, Correlation coefficient, Multiple linear regression.

水稻精準農業體系
SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測
43-60, 2003

SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測

吳啓南*、蕭國鑫、廖子毅
工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室
E-mail: 690398@itri.org.tw

摘要 ---------- 44
一、前言 ---------- 44
二、影像資料獲取與影像前處理 ---------- 46
三、遙測水稻產量推估模式 ---------- 49
四、結果與討論 ---------- 51
五、結語 ---------- 57
六、誌謝 ---------- 58
七、引用文獻 ---------- 58
ABSTRACT ---------- 60

SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測

吳啓南*、蕭國鑫、廖子毅
工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室
E-mail: 690398@itri.org.tw

摘要

本研究分別利用 SPOT 影像及 Duncan 多光譜資料的 NDVI、RVI 及 TVI 植生(被)指數，結合試驗田區坪割產量做爲預估水稻產量的基本資料；再採用具備五種理想化預測能力的逐步迴歸分析向後消去法建立統計迴歸模式，並推導出預估水稻產量的方程式。分析結果如下: (一)結合 91 年 04/18 與 05/28 的 Duncan 資料與水稻坪割資訊，除建立水稻產量模式外；推估 75~89 等八區單號田的產量均方根誤差爲 0.436 與 0.229 公噸/公頃，另推估 81、83 及 87 等四種不同氮肥力區水稻產量均方差分別爲 0.967 與 0.989 公噸/公頃。評估誤差來源除了原始坪割位置代表性外；獲取影像時的 BRDF 效應，使小區取樣之光譜讀值偏移應爲主因。(二) SPOT 多時資料建立的推估水稻產量方程式，預估 91 年二期稻空間產量；預估最高分蘗期、最高分蘗期~抽穗期、最高分蘗期~乳熟期的標準差爲 0.738、0.717 及 0.719 公噸/公頃。評估造成差異因素爲 91 年的生長環境有利於水稻產量提昇；而建立的推估產量方程式以 89 年的水稻產量爲迴歸基準，但 89 年的水稻產量低於 91 年的產量；故以 89 年影像爲正規化比對基準，雖然將波譜反射值調爲接近，但推估的水稻產量會隨之降低。(三) 91 年 SPOT 資料建立的水稻產量方程式預估 92 年一期作產量；利用最高分蘗期、最高分蘗期~孕穗期、最高分蘗期~抽穗期及最高分蘗期~乳熟期影像推估水稻產量標準差爲 0.706、1.409、0.791 及 0.530 公噸/公頃；後者若移除第 89 田區異常值，該田缺氮及沒追肥，則推估水稻產量標準差降爲 0.437 公噸/公頃。(四)評估 92 年一期稻作的產量與氮肥力關係；由於是採用 91 年度產量模式來預測，當時模式發展時並未考慮氮變異施肥，因此預測結果未能反映出高氮及低氮田區的產量變化趨勢,尤其是高氮田區。本年度後續工作將把氮變異施肥田區加入模式發展，並驗證其對產量估測之效。

關鍵詞：水稻產量、迴歸分析、遙測。

一、前言

遙測資料具有高處俯視及多時段獲取影像特性，可密集監測農作物全生育期(full-growth-period)的生長狀況；並藉由多光譜資料的分析來辨別水稻與他種作物的區別，進而預估水稻種植面積及偵測稻作因病蟲

害或肥力不足引起的異常狀態，以快速取得作物異常區範圍後，做有效的防制與追蹤，並提供作爲逆境預警、災害防治或農作施肥的基本資料。另外亦可藉助電腦的快速分析影像資料，再結合作物產量預估模式，提前估測水稻空間產量。

目前臺灣地區的遙測資料中，SPOT 資料是可取得的影像中來源較爲穩定者；且 SPOT 影像的 NDVI 植生指數與其它遙測資料的相關係數達 0.92 已上(吳等；2000)；所以可再結合多種遙測資料分析，以找出最佳遙測水稻監測模式。另外 Duncan MS3100/CIR 地面多光譜近紅外成像儀可同時拍攝綠光、紅光及對植生反應最敏感、訊號最強的近紅外光波段影像；除可輔助地眞調查外，在天候不佳、空中或太空遙測資料無法獲得情況下，此系統亦可結合其它資訊或現場調查資料進行研判分析，以發揮地面監測作用。如能資所利用 Duncan 多光譜近紅外光成像儀進行作物監測方面，初步證實逆境環境與正常生長的水稻光譜反射有所不同(吳等，2001)。因此，本研究即利用具近紅外光波段及同時可獲取紅與綠波段的成像光譜儀攝像系統，除組合成假色影像外，並對水稻生育期及逆境環境下之光譜差異進行偵測，再結合空中遙測影像實施比對與分析。

理想上，作物的生長狀態及產量預估可利用一個農作物模式(crop model)準確加以描述。經結合作物生長模式(crop growth model)及溫度、日照、水及土壤肥力等各種環境因子，便能充分描述農作物每日的生長狀態，乃至收割時之產量。由於作物生長模式輸入參數眾多且複雜；因此，乃有簡化的預測作物產量模式被提出。如使用單一時期或多時期影像的植生指數(Tucker *et al.*, 1980)加以分析，以推估農作物產量。

第五屆“遙測在精準農業的應用”會程中，Scott and Taylor (2000)利用遙測影像的各種植生指數，如 NDVI、DVI 及 GNDVI 指數，分析其與玉米產量之間的關係，發現 GNDVI 指標預測相關性最高可達 0.93 (R^2)；Yang and James (2000)以五個時間的綠/紅/紅外多譜影像及 NDVI 指數，利用多元迴歸分析法分析與玉蜀黍（Sorghum）產量間的關係，發現在最大分蘗期後的影像資料與產量之相關性最爲顯著，並以 NG 指標(NIR/Green)最適合於產量預測。另 Prince (1990)及 Los (1998)亦指出，作物的初級生產率(Primary productivity)間接與 NDVI 指數相關；Maselli 與 Rembold(2001)也成功的利用 13 年 AVHRR 衛星 NDVI 指數，推估摩洛哥(Morocco)、阿爾及利亞(Algeria)、突尼西亞(Tunisia)與埃及(Egypt)等四個國家大面積的穀物產量，其中 NDVI 指數與產量的相關性（R^2）均在 0.65 以上，摩洛哥國家更高達 0.93。目前臺灣地區的稻米產量估測爲利用數千點坪割資料統計而得，但需要在稻米全部收割後才能得到全省的產量資訊；雖然獲得相對較正確的產量資料，但仍爲粗估資料。因此，就此產量推估技術乃結合水稻植被光譜與地眞資料，藉由整合各種遙測資料的光譜反射與田間產量資料，以建立水稻植被光譜與產量之相對較合理的對應關係，再推展到往後的水稻空間產量預估。

另外與作物產量息息相關者爲土壤中氮肥力的多寡,如 Scharf(2000)研究發現玉米含氮量愈高則產量愈高,但有一臨界點,且氮的光譜反射尖峰在波長 550 微米處；Serrano(2000)則發現缺氮小麥在紅光有較強反射,在近紅外光則反射較弱; 水稻應有類似反應,且其氮變異對產量的影響應可反應在光譜的變化上。由於氮素是水稻全生育期中重要的肥力來源，在不同生長期對於氮的吸收量會不同，所以稻株的型態和產量構成要素亦會相異，而產量也隨之變動(林等，1981；1982)。其中營養生長期

和幼穗形成期是兩個氮素供應重要關鍵時段，若有足夠的氮素供應，即可得到好的生產株型與高的產量(張，1988)。而目前的水稻氮肥力管理，主要補充階段分成基肥、2~3 次的追肥和穗肥施用，但仍多憑農民個人之經驗決定施肥的時間與用量，尚不能達到依稻株體內氮營養狀況而施用的精準管理。因此，研究中亦針對精準農業實驗田，規劃多區施予不同肥力的氮素，再利用多時段 SPOT 影像與 Duncan 成像儀資料分析光譜上的差異，並預估其水稻空間產量。

二、影像資料獲取與影像前處理

研究中使用的影像爲 Duncan 多光譜成像儀資料及 SPOT 衛星資料。其中 Duncan 資料爲利用直昇機載台(platform)獲得，獲取的影像因大氣條件不同，且幾何位置與實際地表亦有差異，所以需要經過大氣和幾何校正等影像前處理步驟。SPOT 影像因缺乏攝像當時的探空資料提供絕對輻射校正，故以相對輻射校正的影像正規化(normalization)進行之；而影像幾何條件因錄回的資料爲 Level-10 正射影像資料，所以無須再進行幾何對位的處理工作。

圖 2.1. 精準農業實驗田範圍圖。
(SPOT 影像:攝像日 2003/05/31)

(一)Duncan 資料與影像前處理

1.Duncan 資料獲取

Duncan 多波段攝像系統的拍攝鏡頭角度(FOV) 約爲 20 度，而每幅影像大小爲1392(pixels)*1039(lines)；因此，若拍攝高度低於 380 公尺時的影像空間解像力均屬公分級；如在高度 15 公尺地方所拍攝的影像之空間解像力爲 0.39 公分。爲了使 Duncan 成像資料能在一次拍攝影像中涵蓋精準農業實驗田範圍，並保持高解像力資料；因此，乃將 Duncan 攝像系統懸掛在空載直昇機載台下，並配合水稻最高分蘗期~幼穗形成期的生育狀況，規劃在 1,200~1,800 公尺地區進行三次的空載攝像工作(空間解像力爲 30~45 公分)。

進行飛航攝像時，配合中興大學施行熱波段影像資料獲取，故實際飛航高度相對地面高在 600~800 公尺間；換算爲地面空間解像力，每個像元約爲 15~20 公分。而依此高度拍攝的一幅影像涵蓋範圍在 208*156~278*208 平方公尺之間，故難以在一幅影像中即涵蓋實驗田範圍(如圖 2.1 所示)；因此，實際拍攝影像時爲在實驗田上空不同地區，配合 GPS 資料輔助分別獲取多幅的 Duncan 影像。如圖 2.2 即爲 2003/04/28 日獲取的 Duncan 原始影像。

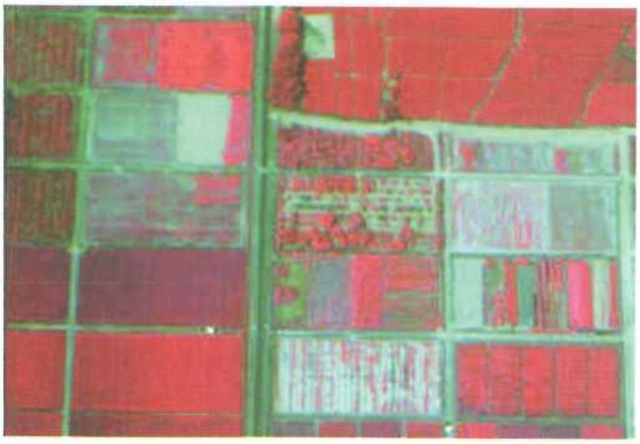


圖 2.2. 2003/04/28 之 Duncan 原始影像。

2.Duncan 資料大氣校正

Duncan 系統於空載攝像時，受到不同大氣的干擾而影響影像品質；於是攝像當時乃在地上置放了標準白板，並結合中興大學於實驗田周圍安置六個地點的白布與黑布輻射資料，據以換算爲地表反射率；而不同田區影像間亦可以綜合進行光譜分析；因此，未進行雙向反射分布函數之進一步處理。

由於 Duncan 設計上僅取用 NIKON/TAKINA 之非球面鏡頭中央視域約 20 度範圍，鏡頭光學損失與地表反射變化有限；而檢視影像分布於中央與邊緣區域的白板及水稻田平均的灰階值變化小於 6，約僅 2% (6/255)的誤差。

3.Duncan 資料幾何校正

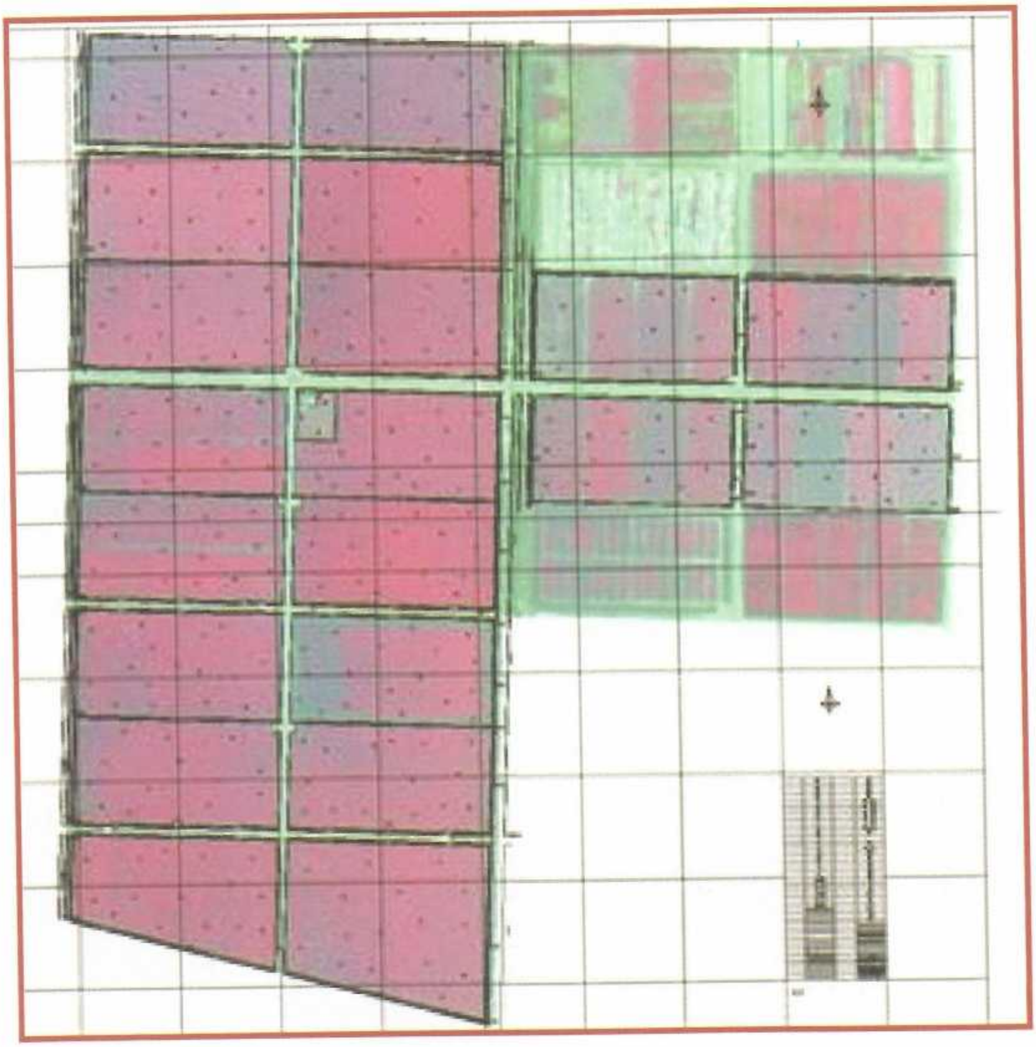


圖 2.3. 經過輻射與幾何校正後的實驗田 Duncan 影像。

Duncan 系統的成像原理與中心投影近似，即影像中心點與周圍地區因投影後的成像條件並不一致，所以影像的幾何形狀與眞實地表會有些許改變；加上空載攝像時的直昇機載台穩定性不夠，所以無法保證獲取得影像爲垂直攝影所得。爲了確保影像的幾何品質，於是配合地面控制點的選取，分幅進行地理對位(geo-coded)，利用能夠保持影像原始資訊的最鄰近法(nearest neighbor)進行多波段影像的重新取樣，最後進行影像合併工作。如圖 2.3 即

爲經過輻射與幾何校正後的實驗田 Duncan 影像，地面解析度爲 25 公分，約略大於稻作的植株間隔 2.4 倍。另外因爲像元解析力仍大於水稻植株間隔，因此不均勻覆蓋影像不會發生，所有灰階與植生指數變化除系統誤差外皆可視爲水稻田的生長差異。

(二)SPOT 資料影像前處理

獲取多時段 SPOT 資料時，影像品質會因不同大氣條件的干擾，所以地面上近於不變地物的光譜反射值會產生差異。在沒有攝像當時的大氣探空資料提供絕對大氣輻射校正時，相對的輻射校正仍是必須的。研究中以 2000/06/24 的 SPOT 影像爲基準，其他時間的影像資料均與此日期的影像進行相對的輻射校正，即進行影像正規化的工作。如圖 2.4 即爲 91 年二期稻與 92 年一期稻作期間獲取的正規化 SPOT 影像。另外亦考慮波段比例法亦可以減少部份大氣效應，所以再利用正規化後的比例影像資料進行分析。如正規化差異植生指數(NDVI)、比例植生指數(RVI)與轉換植生指數(TVI)等三種均具有紅外光段與紅光段比值的指數方法。

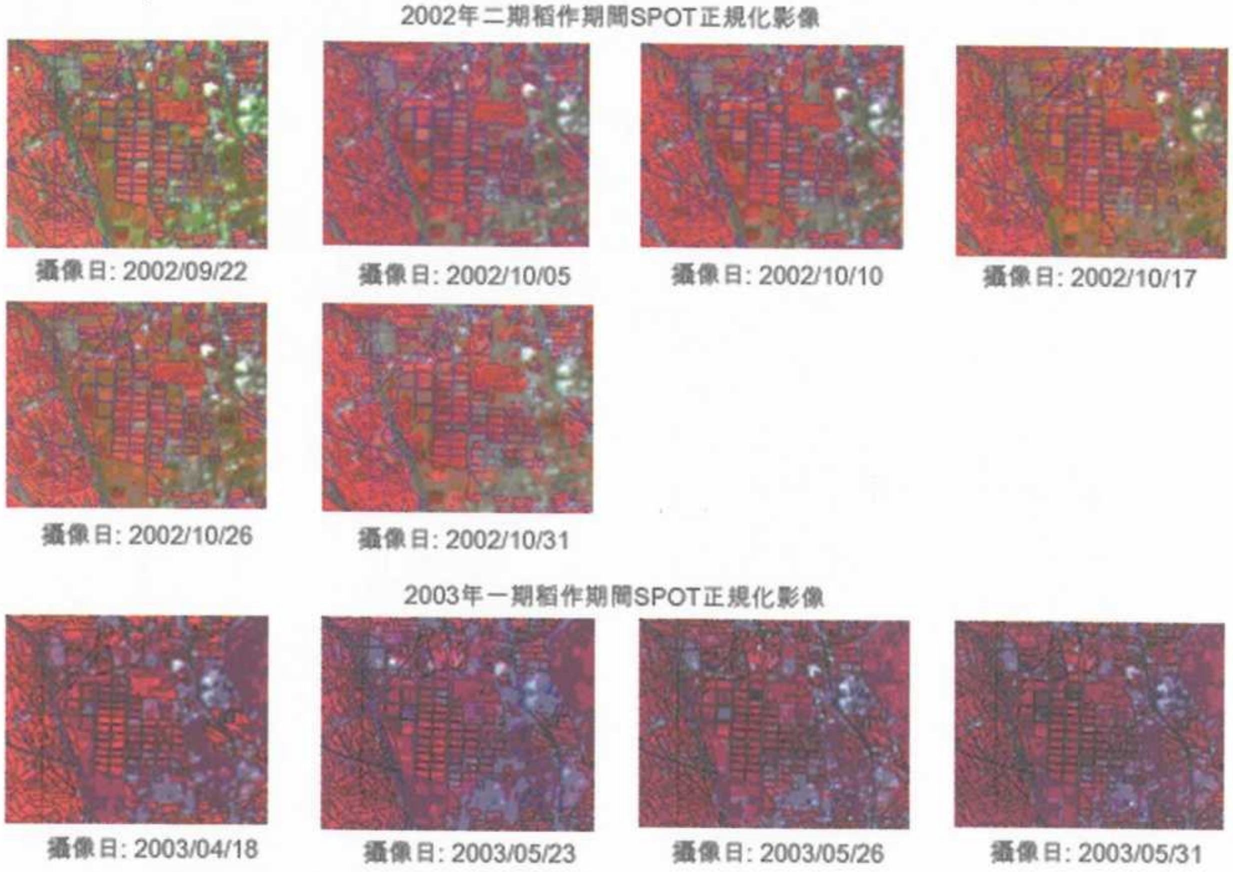


圖 2.4. 91 年二期稻與 92 年一期稻作期間獲取的正規化 SPOT 影像。

農試所規劃實驗田坵塊面積均爲 0.5 公頃，對應到 SPOT 影像後的坵塊中心三個網格爲水稻純像元(pure pixel)；所以先採用翰林濾波(Hanning filter)法，統計各坵塊代表的水稻波譜反射值後，再計算 NDVI、RVI 及 TVI 植生指數(如表 2.1 所示)。另水稻實際產量資料則計算各坵塊 8 小區坪割資料中的中間 4 小區的平均值，以代表水稻田間產量。最後再利用 SPOT 影像轉換的三種指數，配合田間坪割產量，建立遙測水稻產量推估模式，並估測水稻的空間產量分佈。

表 2.1. 92 年一期稻作期間 SPOT 正規化影像之 NDVI、RVI 及 TVI 指數值。

日期	NDVI				RVI				TVI			
編號	04/20	05/23	05/26	05/31	04/20	05/23	05/26	05/31	04/20	05/23	05/26	05/31
38	0.348	0.358	0.366	0.353	2.073	2.114	2.166	2.096	0.921	0.926	0.931	0.924
39	0.508	0.474	0.479	0.461	3.076	2.805	2.860	2.717	1.004	0.987	0.989	0.980
42	0.504	0.442	0.381	0.381	3.053	2.596	2.233	2.234	1.002	0.971	0.938	0.939
43	0.450	0.438	0.445	0.431	2.634	2.558	2.609	2.515	0.974	0.968	0.972	0.965
74	0.615	0.566	0.507	0.472	4.206	3.609	3.061	2.786	1.056	1.032	1.004	0.986
75	0.624	0.584	0.522	0.489	4.319	3.806	3.185	2.916	1.060	1.041	1.011	0.995
76	0.632	0.527	0.473	0.434	4.447	3.234	2.794	2.532	1.064	1.014	0.986	0.966
77	0.638	0.600	0.512	0.463	4.533	4.001	3.097	2.725	1.067	1.049	1.006	0.981
78	0.512	0.499	0.473	0.443	3.137	3.011	2.811	2.602	1.006	0.999	0.986	0.971
79	0.605	0.573	0.538	0.494	4.060	3.679	3.327	2.949	1.051	1.036	1.019	0.997
80	0.685	0.572	0.494	0.457	5.388	3.668	2.951	2.685	1.089	1.035	0.997	0.978
81	0.540	0.491	0.423	0.428	3.359	2.933	2.465	2.498	1.020	0.996	0.961	0.963
82	0.623	0.557	0.534	0.478	4.324	3.515	3.288	2.833	1.060	1.028	1.017	0.989
83	0.545	0.487	0.439	0.454	3.394	2.899	2.563	2.662	1.022	0.993	0.969	0.977
84	0.644	0.537	0.475	0.442	4.630	3.323	2.809	2.588	1.070	1.018	0.987	0.971
85	0.641	0.524	0.432	0.402	4.567	3.207	2.519	2.346	1.068	1.012	0.965	0.950
86	0.649	0.509	0.486	0.432	4.706	3.071	2.893	2.524	1.072	1.004	0.993	0.966
87	0.672	0.538	0.517	0.469	5.094	3.329	3.139	2.769	1.082	1.019	1.008	0.985
88	0.522	0.466	0.433	0.384	3.185	2.747	2.527	2.246	1.011	0.983	0.966	0.940
89	0.545	0.440	0.403	0.377	3.394	2.574	2.353	2.212	1.022	0.970	0.950	0.936

三、遙測水稻產量推估模式

遙測水稻產量推估利用最高分蘗期(maximum tillering stage)以後，經過正規化的影像資料；並以 NDVI、RVI 與 TVI 等三種植生指數，配合坪割資料進行統計分析，再以線性多元迴歸（linear multiple regression）模式推導出迴歸方程式，從而建立遙測水稻產量推估模式(吳啓南、等；2001)。

(一)遙測水稻產量推估模式

水稻產量和遙測影像的線性多元迴歸模式推求方式如下：

$$Y = X\beta + \sum \qquad (3\text{-}1)$$

Y：水稻產量估測值；　X：多光譜影像各種指數值

$\sum$：隨機誤差；　β：求解之迴歸係數

選擇適於預測水稻產量推估最佳資料，採用向後消去法逐步迴歸分析（stepwise regression by backward elimination）決定最佳水稻產量預測模式。其中具理想化預測能力的統計迴歸模式需滿足(1)評估統計量 ti (t-statistic)應≧2.0 (2)變異數分析之 F-test 與 F 值在 α =5%時之比值應≧4.0 (3)評估推定值與實測值誤差量應接近於 0 (4)迴歸係數是否趨近於 1 (5)標準化期望總推定差與推定係數個數比 Ck/(k+1)≦1.0 等五種評估標準(吳等，1989)。

遙測水稻產量迴歸分析完畢，即依迴歸方程式輸入常數及顯著指數的資料，並進行大面積的水稻空間產量推估。估算方式如(3-2 式)所示：

$$Y = K_0 + K_1(B_1) + K_2(B_2) + \ldots\ldots\ldots \qquad (3\text{-}2)$$

(3-2)式中，Y 為遙測推估水稻產量估計值，Bi 為各顯著波段的波譜亮度值或植生指數值，並不是各波段的輻射量；Ki 為各顯著波段對應的迴歸係數。

(二)遙測水稻產量推估方程式建立

遙測水稻產量推估模式利用如圖 3.1 步驟的多元迴歸分析結果，逐次建立兩期稻作的空間產量推估方程式；Fy91 一期稻及 Fy89 二期稻最佳預測模式如表 3.1 所示。其中一期作期間綜合四幅影像與坪割資料的迴歸相關係數雖然達 0.87，標準誤差 0.32 公噸/公頃，但 F-test 沒有通過 α =5%時之比值≧4.0 標準，所以尚未達理想化的統計標準。二期稻作期間則具有理想化統計預測能力，且結合最高分蘗期~乳熟期四幅影像，對應水稻坪割產量的迴歸相關係數達 0.93，統計標準差 0.36 公噸/公頃。

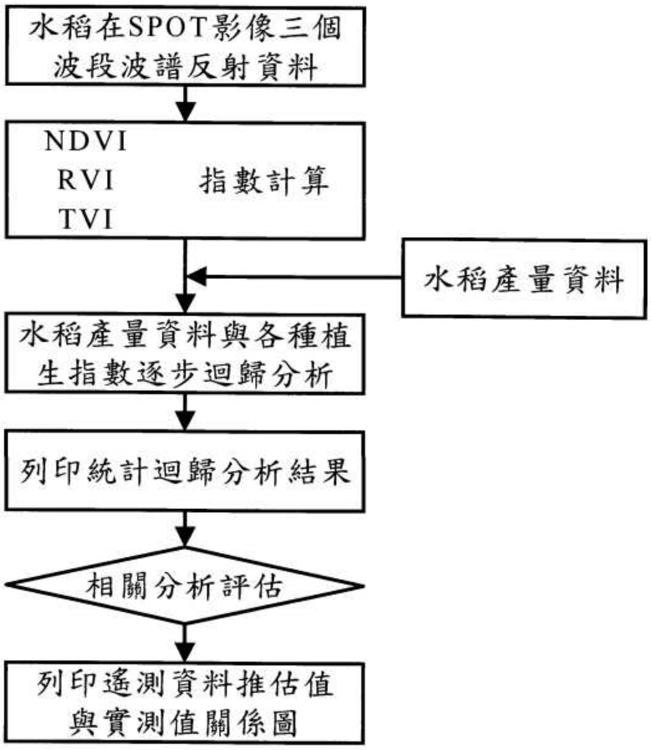


圖 3.1. 遙測水稻空間產量推估流程圖。

表 3.1. 農試所實驗田兩期稻作預估水稻產量多元迴歸分析結果。

對照水稻生育期	水稻期別	F(0.05)	標準誤差	迴歸相關係數	迴 歸 方 程 式
最高分蘗期	91一	10.1184	0.413	0.6000	Y=-2.49983+8.62910*T(1)
最高分蘗期~孕穗期	91一	6.6424	0.340	0.7995	Y=-26.3501+210.1261*N(2)-24.1149*R(2)-84.4958*T(1) +87.6449*T(2)
最高分蘗期~抽穗期	91一	10.6414	0.354	0.7456	Y=-7.39665+82.3884*N(2)-9.18160*R(2)
最高分蘗期~乳熟期	91一	5.1167	0.317	0.8655	Y=325.338-16.6527*N(1)+166.3649*N(2)-8.1672*N(3)+ 248.3428*N(4)-16.5794*R(2)+2.0027*R(3)-467.867*T(4)
最高分蘗期	89二	7.0254	0.624	0.6727	Y=-78.63325-62.50304*N(1)+115.47020*T(1)
最高分蘗期~孕穗期	89二	12.6686	0.480	0.8389	Y=92.06286-71.53019*N(1)+2.04536*R(2)+126.26520*T (1)
最高分蘗期~抽穗期	89二	12.6686	0.480	0.8389	Y=-92.06286-71.53019*N(1)+2.04536*R(2)+126.26520* T(1)
最高分蘗期~乳熟期	89二	13.6914	0.361	0.9292	Y=1054.568-88.25141*N(1)+272.8497*N(2)+550.9645* N(4)+159.6314*T(1)-518.6057*T(2)-1058.084*T(4)

附註: 最高分蘗期(1)、孕穗期(2)、抽穗期(3)、乳熟期(4)；NDVI 指數:N(1-4)；RVI 指數:R(1-4)；TVI 指數:T(1-4)

四、結果與討論

配合精準農業之試驗研究，農試所規劃多區實驗田爲不同肥力之氮變異區(如圖 4.1 所示)，以評估不同的氮施肥區對產量之影響；再配合不同的遙測資料進行水稻空間產量的推估。

(一)Duncan 影像分析結果

Duncan 資料推估水稻產量推估模式亦如3.1 節所述；不同者爲其具有較佳的空間解析能力，可提供地面公分級的產量分析資料，但實際有效網格視地面採樣(坪割)尺度而定。如92 年度坪割資料爲將實驗田劃分的八小區中，每一小區均隨機圈定坪割區域，並代表此小區的平均產量；所以 Duncan 各田區影像暫時以八小區進行像元平均，而推估產量模式之有效尺度亦由 1.4 公尺(坪割週界長)降至 25 公尺。

(a)實驗田編號　　(b)氮變異區施肥分布圖

圖 4.1. 農試所精準農業試驗田 Fy92 一期稻氮變異區分佈圖。

表 4.1 爲 Duncan 在 2002 年 4 月 18 日攝取影像中相對各田區之光譜參數。其中的IARR(Internal Average Relative Reflectance)運用於三光譜波段，可以降低大氣影響；而NDVI、RVI 與 TVI 植生指數均具對植被特別敏感的近紅外光段資料參與比值貢獻，對於估測與水稻產量相關的葉綠素具有物理性的意義。

91 年一期稻作期間的 Duncan 產量模式依田區肥力施作狀態，可分爲四組預測水稻產量資料(如表 4.2 所示)；如代表 62%生長期(04/18，最高分櫱期)與 94%生長期(05/28，黃熟期)的水稻產量推估模式及不同氮肥力區水稻生長模式。若將表 4.2 的四個迴歸方程式分別代入 Duncan 資料，則可得到如表 4.3 與表 4.4 所示之水稻產量推估資料。

而由圖 4.2 可顯示預測水稻產量與坪割資料的誤差分布；其中利用 Duncan 資料的預測值與實際坪割資料坐落於對角線者，代表推估結果準確度高。經計算預測值與坪割產量的標準差(RMS)後，統計 04/18 的誤差量爲 0.436 公噸/公頃，而 05/28 的誤差量爲降爲 0.229 公噸/公頃；另外計算氮變異區的水稻產量推估結果，評估的標準差提升爲 0.969 公噸/公頃及 0.989 公噸/公頃。

表 4.1. 2002 年 4 月 18 日全區 Duncan 參數對照表。

田號	小區	產量	NIR	R	G	IARR NIR	IARR R	IARR G	NDVI	RVI	TVI
87	A1	6.17	193.327	33.531	68.265	1.091	1.270	1.178	-0.076	0.859	0.651
87	B1	7.03	212.678	29.133	63.378	1.200	1.103	1.094	0.042	1.088	0.736
87	C1	4.91	205.056	26.456	59.744	1.157	1.002	1.031	0.072	1.155	0.756
87	D1	4.96	196.689	27.133	67.433	1.110	1.027	1.163	0.039	1.080	0.734
87	A2	4.89	187.900	32.144	66.133	1.060	1.217	1.141	-0.069	0.871	0.657
87	B2	6.99	204.078	29.500	62.067	1.152	1.117	1.071	0.015	1.031	0.718
87	C2	4.87	200.778	26.456	58.722	1.133	1.002	1.013	0.061	1.131	0.749
87	D2	3.64	193.533	28.000	68.111	1.092	1.060	1.175	0.015	1.030	0.718
83	A1	4.89	185.163	31.041	65.286	1.045	1.175	1.126	-0.059	0.889	0.664
83	B1	4.45	175.918	29.388	67.408	0.993	1.113	1.163	-0.057	0.892	0.666
83	C1	4.66	188.714	24.735	59.020	1.065	0.937	1.018	0.064	1.137	0.751
83	D1	6.52	194.551	22.204	54.143	1.098	0.841	0.934	0.133	1.306	0.795
83	A2	6.4	173.735	31.429	64.204	0.980	1.190	1.108	-0.097	0.824	0.635
83	B2	4.55	165.612	31.245	68.306	0.935	1.183	1.179	-0.117	0.790	0.619
83	C2	5.11	178.245	25.265	58.224	1.006	0.957	1.005	0.025	1.051	0.725
83	D2	6.61	176.245	22.143	51.776	0.995	0.838	0.893	0.085	1.186	0.765
81	A1	4.65	148.000	25.429	54.898	0.835	0.963	0.947	-0.071	0.867	0.655
81	B1	4.17	159.204	22.796	51.245	0.898	0.863	0.884	0.020	1.041	0.721
81	C1	6.4	141.265	24.020	26.122	0.797	0.910	0.451	-0.066	0.876	0.659
81	D1	4.41	153.286	18.388	45.469	0.865	0.696	0.785	0.108	1.242	0.780
81	A2	4.87	151.592	27.163	56.878	0.855	1.029	0.981	-0.092	0.832	0.639
81	B2	3.85	161.796	24.102	52.592	0.913	0.913	0.907	0.000	1.000	0.707
81	C2	6.59	146.673	22.939	54.776	0.828	0.869	0.945	-0.024	0.953	0.690
81	D2	6.09	158.837	19.163	46.776	0.896	0.726	0.807	0.105	1.235	0.778

表 4.2. 91 年 Duncan 水稻產量模式。

91 年產量模式區分	迴 歸 方 程 式
全區產量模式 I	產量 = 3.926 + 11.011 NIR - 6.005 Red - 3.168 Green
全區產量模式 II	產量 = 69.457 + 82.769 NIR - 52.356 Red - 32.791 Green - 60.443 RVI
氮變異區產量模式 I	產量 = 3.766 + 5.689 NIR - 4.126 Green - 3.817 NDVI
氮變異區產量模式 II	產量 = 1.045 + 3.331 NIR - 1.263 NDVI + 0.929 RVI

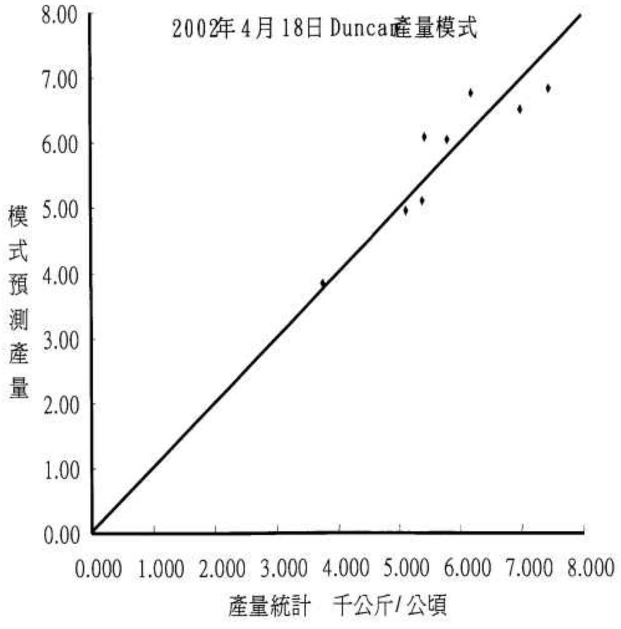
產量：千公斤/公頃； NIR、Red、Green、RVI、NDVI：reflectance index

表 4.3. 2002 年 4/18 與 5/28 日 Duncan 全區模式推估水稻產量估計誤差。

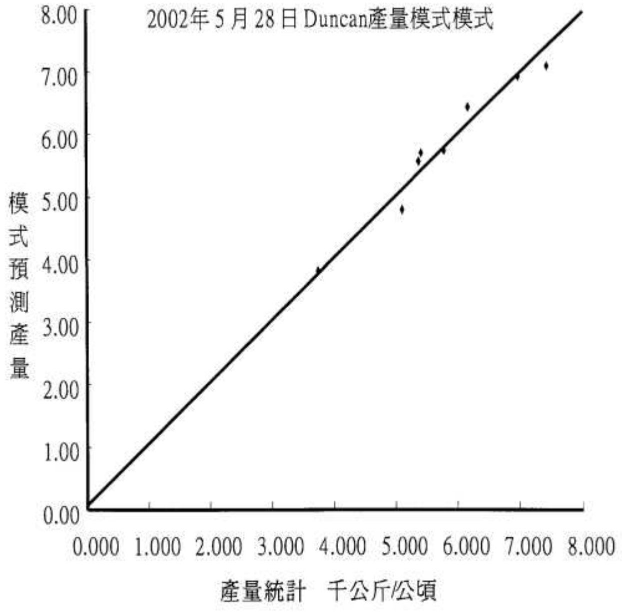
田區編號	2002/04/18 日水稻產量推估結果			2002/05/28 日水稻產量推估結果		
	產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃	產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃
89	3.750	3.83	-0.083	3.750	3.96	-0.205
87	5.430	6.08	-0.646	5.430	5.35	0.081
85	6.990	6.51	0.476	6.990	7.56	-0.567
83	5.390	5.11	0.280	5.390	6.02	-0.627
81	5.120	4.95	0.173	5.120	5.29	-0.170
79	5.800	6.04	-0.238	5.800	6.14	-0.336
77	6.190	6.77	-0.575	6.190	5.99	0.201
75	7.440	6.83	0.609	7.440	7.31	0.134

產量= 3.926 +11.011 NIR - 6.005 Red -3.168 Green
RMS error = 0.436 公噸/公頃

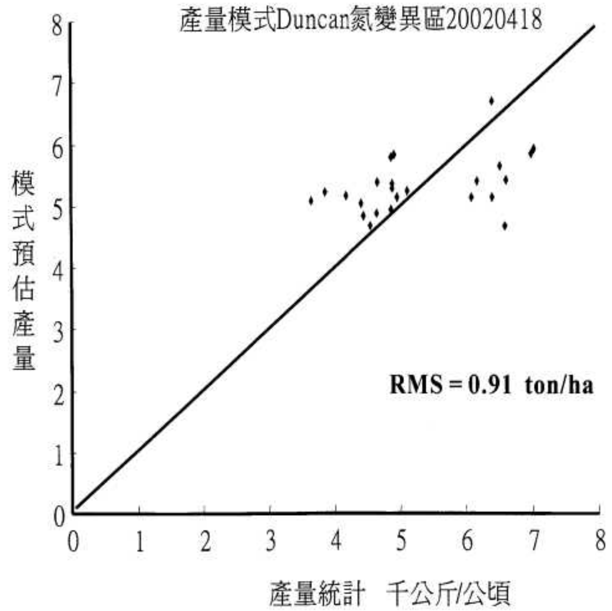
產量 = 69.457 + 82.769 NIR - 52.356 Red - 32.791 Green - 60.443 RVI
RMS error = 0.229 公噸/公頃



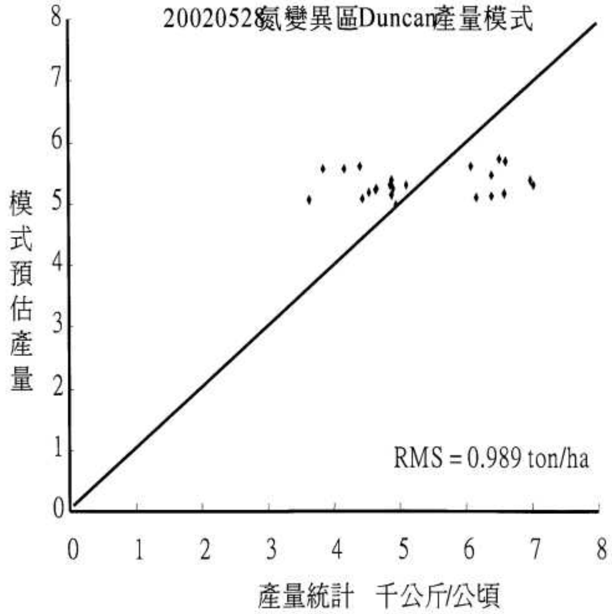
(a) 2002/04/18全區推估結果



(b) 2002/05/28全區推估結果



(a) 2002/04/18氮變異區推估結果



(b) 2002/05/28氮變異區推估結果

圖 4.2. Duncan **影像推估** 91 **年水稻產量與坪割資料採樣值分布**。

表 4.4. 2002 年 4/18 與 5/28 日 Duncan 氮變異區模式推估 92 年水稻產量估計誤差。

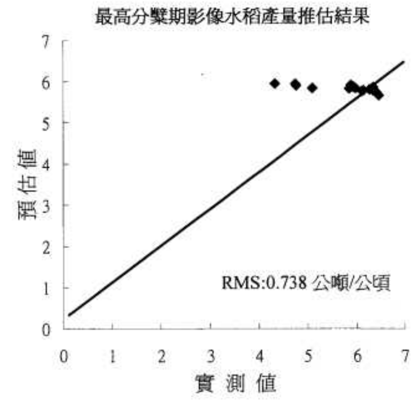
田區編號	小區	2002/04/18 日水稻產量推估結果 產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃	2002/05/28 日水稻產量推估結果 產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃
87	A1	6.17	5.40	0.77	6.17	5.09	1.08
87	B1	7.03	5.92	1.11	7.03	5.30	1.73
87	C1	4.91	5.82	-0.91	4.91	5.23	-0.32
87	D1	4.96	5.13	-0.17	4.96	4.98	-0.02
87	A2	4.89	5.35	-0.46	4.89	5.14	-0.25
87	B2	6.99	5.84	1.15	6.99	5.39	1.60
87	C2	4.87	5.80	-0.93	4.87	5.29	-0.42
87	D2	3.64	5.07	-1.43	3.64	5.06	-1.42
83	A1	4.89	5.29	-0.40	4.89	5.38	-0.49
83	B1	4.45	4.83	-0.38	4.45	5.07	-0.62
83	C1	4.66	5.38	-0.72	4.66	5.24	-0.58
83	D1	6.52	5.65	0.87	6.52	5.73	0.79
83	A2	6.4	5.14	1.26	6.4	5.46	0.94
83	B2	4.55	4.67	-0.12	4.55	5.18	-0.63
83	C2	5.11	5.25	-0.14	5.11	5.31	-0.20
83	D2	6.61	5.41	1.20	6.61	5.70	0.91
81	A1	4.65	4.88	-0.23	4.65	5.21	-0.56
81	B1	4.17	5.15	-0.98	4.17	5.56	-1.39
81	C1	6.4	6.69	-0.29	6.40	5.13	1.27
81	D1	4.41	5.04	-0.63	4.41	5.60	-1.19
81	A2	4.87	4.93	-0.06	4.87	5.30	-0.43
81	B2	3.85	5.22	-1.37	3.85	5.57	-1.72
81	C2	6.59	4.67	1.92	6.59	5.17	1.42
81	D2	6.09	5.13	0.96	6.09	5.61	0.48
產量 = 3.766 + 5.689 NIR - 4.126 Green - 3.817 NDVI RMS error = 0.967 公噸/公頃					產量 = 1.045 + 3.331 NIR - 1.263 NDVI + 0.929 RVI；RMS error = 0.989 公噸/公頃		

(二)SPOT 影像分析結果

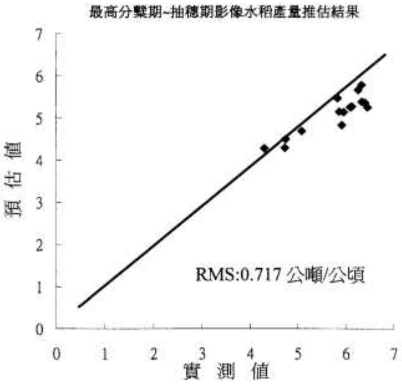
1.91 年二期水稻空間產量推估結果

以 SPOT 多時影像與水稻坪割資料建立的遙測水稻產量方程式，再利用 91 年二期稻作期間攝像日期接近的四幅影像，預估水稻空間產量，預估結果如表 4.5 所示。其中在最高分蘗期影像推估結果，水稻產量標準差 0.74 公噸/公頃；結合幼穗形成期~孕穗期或抽穗期影像預估的標準差爲 0.72 公噸/公頃；再結合乳熟期影像的產量標準差爲 0.72 公噸/公頃。圖 4.3 爲推估 91 年二期水稻產量後，再比對農試所水稻坪割產量之實測值與預估值關係圖。

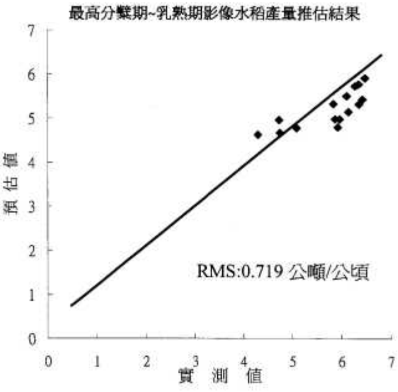
SPOT 影像推估 91 年二期水稻水稻空間產量之實測值與預估值關係圖



(a)最高分蘗期影像

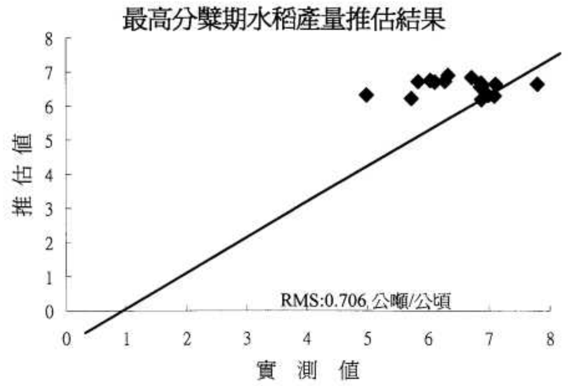


(b)最高分蘗期~抽穗期影像

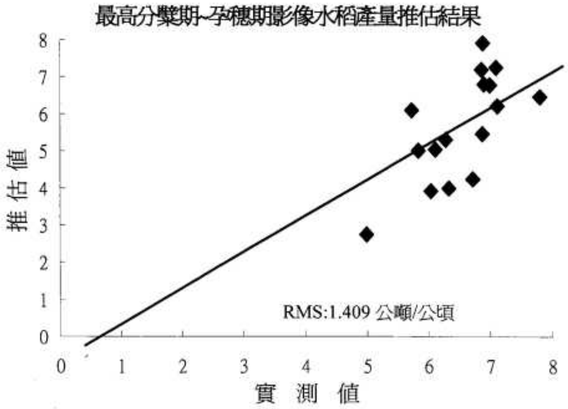


(c)最高分蘗期~乳熟期影像

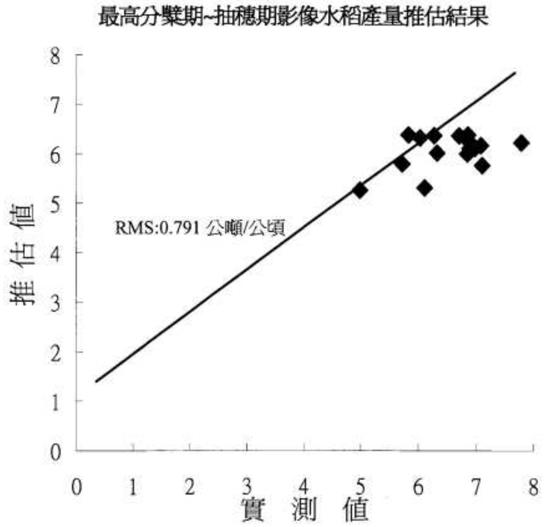
SPOT 影像推估 92 年一期水稻空間產量之實測值與預估值關係圖



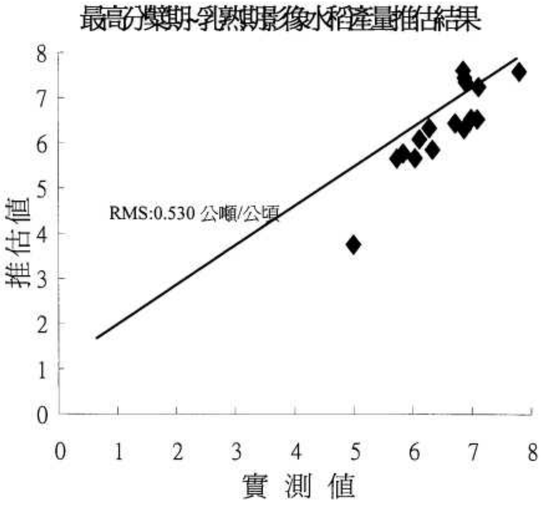
(a)最高分蘗期影像



(b)最高分蘗期~孕穗期影像



(c)最高分蘗期~抽穗期影像



(d)最高分蘗期~乳熟期影像

圖 4.3. SPOT 影像推估水稻空間產量之實測值與預估值關係圖。

表 4.5. 遙測水稻產量推估方程式預估 91 年二期稻與 92 年一期稻空間產量分佈。

編號	推估 91 年二期稻作產量(公噸/公頃)					預估 92 年一期稻作產量(公噸/公頃)					
	坪割產量	1	1~2	1~3	1~4	坪割產量	1	1~2	1~3	1~4	氮肥力
38	4.733	5.945	4.292	4.292	4.960	6.900	5.450	1.183	2.670	0.884	氮變異區
39	4.748	5.901	4.498	4.498	4.667	7.115	6.169	7.294	5.927	6.878	氮變異區
42	5.960	5.835	5.141	5.141	4.978	6.813	6.155	4.667	5.325	4.513	氮變異區
43	氮變異區	5.834	3.139	3.139	4.595	6.115	5.910	6.510	5.194	5.469	氮變異區
74	5.835	5.827	5.471	5.471	5.325	6.900	6.615	6.809	6.108	7.354	正常管理
75	6.335	5.781	5.785	5.785	5.772	7.115	6.648	6.223	5.762	7.252	正常管理
76	5.085	5.839	4.691	4.691	4.777	6.873	6.682	5.468	6.381	6.319	正常管理
77	6.340	5.860	5.387	5.387	5.320	6.115	6.706	5.042	5.310	6.088	正常管理
78	6.408	5.735	5.365	5.365	5.426	6.880	6.194	7.918	6.258	7.453	正常管理
79	6.263	5.804	5.666	5.666	5.730	6.858	6.570	7.199	5.996	7.609	正常管理
80	5.870	5.911	5.154	5.154	4.982	6.335	6.898	3.993	6.014	5.857	N210
81	氮變異區	5.616	3.676	3.676	4.360	7.095	6.304	7.258	6.166	6.534	N210
82			未種植水稻			7.800	6.647	6.475	6.223	7.591	正常管理
83	氮變異區	5.879	3.603	3.603	4.606	6.993	6.321	6.784	6.112	6.543	N210
84	6.098	5.761	5.261	5.261	5.504	6.283	6.731	5.309	6.365	6.334	N130
85	6.458	5.662	5.256	5.256	5.913	5.838	6.716	5.011	6.379	5.774	N130
86	6.133	5.784	5.275	5.275	5.150	6.040	6.752	3.919	6.319	5.668	N130
87	氮變異區	5.516	3.486	3.486	3.836	6.720	6.841	4.245	6.363	6.443	N120
88	5.923	5.864	4.834	4.834	4.797	5.728	6.224	6.099	5.793	5.657	N065
89	4.298	5.948	4.281	4.281	4.622	4.990	6.321	2.744	5.254	3.750	N065
	R.M.S.	0.738	0.717	0.717	0.719	R.M.S.	0.706	1.409	0.791	0.530	

1:最高分蘗期；2:幼穗形成期~孕穗期；3:抽穗期；4:乳熟期影像

2.92 年一期水稻空間產量推估結果

利用同 3.1 節所述的遙測水稻產量方式，預估 92 年一期稻作產量，推估結果亦如表 4.5 所示。其中最高分蘗期影像推估水稻產量標準差 0.71 公噸/公頃；結合幼穗形成期~孕穗期影像的標準差爲 1.41 公噸/公頃，另綜合抽穗期影像預估的標準差爲 0.79 公噸/公頃；再結合乳熟期影像的產量標準差則爲 0.53 公噸/公頃。圖 4.3 爲 SPOT 影像推估 92 年一期水稻產量後，再比對農試所水稻坪割產量之實測值與預估值關係圖。

(三)分析結果討論

本研究證實 Duncan 資料可以藉由高空作業車之幫助，以獲取、分析並建立可行之水稻產量模式；同時保有高空間的解析能力。而在 91 年一期作資料中，5 月 28 日影像推估水稻產量模式建立上優於 4 月 18 日影像資料；其產量推估之均方根誤差分別爲 0.229 公噸/公頃與 0.436 公噸/公頃。

Duncan 資料分析氮變異施肥田區建立的產量模式誤差較大；如 5 月 28 日與 4 月 18 日資料建立的產量模式，推估誤差分別爲 0.989 公噸/公頃與 0.967 公噸/公頃。誤差來源除了原始坪割位置代表性外，光譜參數分布中，過大的 BRDF 效應，使小區取樣之光譜讀值偏移應爲主因。由於此現象在斜攝獲取影像屬不可避免，所以未來系統應用時具有侷限性。而斜攝影像可以推估大面積田區的平均產量，但是像元級空間分布資訊則不可避免將需要 BRDF 校正；另一可行之做法便是將攝像系統以空中載台獲得垂直攝取影像，此可以部分降低水稻作物的表面 BRDF 影響。

利用 SPOT 資料建立的迴歸方程式預估水稻空間產量；其中預估 91 年二期稻的空間產量比對坪割資料後，預估最高分蘗期、最高分蘗期~抽穗期、最高分蘗期~乳熟期的標準

差爲 0.738、0.717 及 0.719 公噸/公頃，明顯地遙測推估產量較實際坪割平均產量低。造成此差異原因爲 91 年二期稻作期間的平均溫度較高，且水稻插秧後的累計日照量較多；生長環境的不同造成水稻產量提昇；而 91 年的多時段影像中，光譜資料乃以 89 年的影像爲基準進行影像正規化，雖然將光譜反射值調整爲接近一致，但 89 年的水稻產量原就低於 91 年的產量資料，所以推估水稻產量推估值亦因之而降低。

另外預估 92 年一期稻作的產量；利用最高分蘗期、最高分蘗期~孕穗期、最高分蘗期~抽穗期及最高分蘗期~乳熟期影像推估的標準差爲 0.706、1.409、0.791 及 0.530 公噸/公頃；其中若將缺氮及沒追肥的第 89 田區的異常差異去除，則利用最高分蘗期~孕穗期多時影像推估誤差可降爲 0.437 公噸/公頃。

評估 92 年一期稻作的產量與氮肥力關係，表 4.5 顯示利用以前發展的模式並無法反應氮變異田區的產量趨勢關係，因爲當時模式發展時並未涵蓋氮變異施肥田區。此問題將在後續工作中嘗試解決,利用保留給 SPOT 影像的數個整塊田區的資料來發展相應模式

五、結語

本研究利用 SPOT 影像及 Duncan 資料，利用 NDVI、RVI 及 TVI 三種指數及結合試驗田區產量資料，做爲預估水稻產量的基本資料；並採用逐步迴歸分析向後消去法，以具備(1)迴歸相關係數趨近於 1 (2)均方差接近於 0 (3)F-test 與 F 值在 α=5%時之比值≧4.0 (4)統計量 ti≧2.0 (5)標準化期望總推定差與推定係數個數比 Ck/(k+1)≦1.0 等五種理想化預測能力的統計迴歸模式爲評估基準，再推導出預估水稻產量方程式。分析結果討論與建議如下:

(一)利用 91 年一期稻作期間的 04/18 與 05/28Duncan 資料，除建立水稻產量模式外，推估坐落於實驗田左側的 75~89 單號田等八區，推估產量之均方根誤差分別爲 0.436 公噸/公頃與 0.229 公噸/公頃。另推估 81、83 及 87 等實驗田均分爲四種不同氮肥力區的產量，推估誤差分別爲 0.967 公噸/公頃與 0.989 公噸/公頃；評估誤差來源除了原始坪割位置代表性外，光譜參數分布中，過大的 BRDF 效應，使小區取樣之光譜讀值偏移應爲主因。

(二)以 SPOT 資料建立的迴歸方程式預估 91 年二期稻的空間產量，預估最高分蘗期、最高分蘗期~抽穗期、最高分蘗期~乳熟期的標準差爲 0.738、0.717 及 0.719 公噸/公頃。造成差異主原爲 91 年二期稻作期間的平均溫度較高，且累計日照量較多，生長環境的不同造成水稻產量提昇;而建立的推估水稻產量方程式以 89 年的水稻產量爲迴歸基準，但 89 年的水稻產量原就低於 91 年的產量，所以在以 89 年的影像爲正規化基準後，雖然將波譜反射值調爲接近，但推估的水稻產量會隨之降低。

(三) 91 年多時 SPOT 資料建立的水稻產量方程式預估 92 年一期稻作的產量；利用最高分蘗期、最高分蘗期~孕穗期、最高分蘗期~抽穗期及最高分蘗期~乳熟期的影像，推估的水稻產量標準差爲 0.706、1.409、0.791 及 0.530 公噸/公頃；其中若將第 89 田區的異常值去除，則最高分蘗期~孕穗期多時段影像推估產量誤差降爲 0.437 公噸/公頃。

(四)評估 92 年一期稻作的產量與氮肥力關係；由於是採用 91 年度產量模式來預測,當時模式發展時並未考慮氮變異施肥,因此預測結果未能反映出高氮及低氮田區的產量變化趨勢,尤其是高氮田區,低氮田區的預測趨勢則較合理。本年度後續工作將把氮變異施肥田區加入模式發展並驗證其效。

六、誌謝

本研究承行政院農委會 92 農科-1.1.6-農-C(01)之水稻生育狀況與環境監測系統~水稻生長、逆境及產量之監測與估測技術研究~SPOT 衛星與地面近紅外成像儀之監測應用計畫支援，農試所提供精準農業試驗田水稻產量資料，研究得以完成，深致謝忱。

七、引用文獻

吳啓南、蕭國鑫、廖子毅、徐偉城、劉治中。2000。運用空載多譜掃描及地面成像光譜儀監測水稻生育及自動辨識研究，工研院能資所第 063-89-W043 報告，共 70 頁。

吳啓南、蕭國鑫、廖子毅、徐偉城、劉治中。2001。SPOT 衛星與地面近紅外成像儀之監測應用，工研院能資所第 063-90-W011 報告，共 122 頁。

林鴻淇、鍾仁賜、涂秀麗。1981。溫度與光氣候及營養間之交感對水稻之發育與分化及營養生理的效應 II 對氮素吸收、分配及利用之影響，中國農業化學會誌 19:115-124。

林鴻淇、鍾仁賜。1982。光氣候、溫度和氮肥之交感對水稻不稔之影響，中國農業化學會誌 20:21-31。

張正賢。1988。稻作學精要。國立編譯館，臺北市。

吳啓南、蕭國鑫等七人。1989。遙測資料應用於二仁溪及北港溪水污染調查報告，工研院能資所 78 污染與公害防治專案計畫報告，共 141 頁。

Los, S.O. 1998. Linkages between Global Vegetation and Climate. *An Analysis Based on NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data.* PhD. Dissertation. Vrije Universiteit, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, PP.179.

Maselli, F. and F. Rembold. 2001. Analysis of GAC NDVI Data for Cropland Identification and Yield Forecasting in Mediterranean African Countries, Photogram. Eng. Remote Sens. 67:5:593-602.

Prince, S.D. 1990. High Temporal Frequency Remote Sensing of Primary Production Using NOAA AVHRR, *Applications of Remote Sensing in Agriculture.* M.D. Steven and J.A. Clark, eds. Butterworths London, U.K. 4:169~183.

Scharf, P. and J. Lory. 2000. Calibration of Remotely Sensed Corn Color to Predict Nitrogen Need, Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture.

Staggenborg, S. and R. Taylor. 2000. Predicting Grain Yield Variability Using Infrared Image, CD-ROM, Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, MN, USA.

Serrano, L., I. Filella and J. Penuelas. 2000. Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat Under Different Nitrogen Supplies. Crop Sci. 40:723-730.

Tucker, C. J. 1979. Monitoring Corn and Soybean Development with Hand-held Radiometer Spectral Data. Remote Sens. Environ. 8:237-248.

Yang, C. and James Everitt. 2000. Relationships Between Yield Monitor Data and Airborne Multispectral Digital Imagery, CD-ROM, Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis, MN, USA.

Rice Yield Estimation Using SPOT and DUNCAN Imagery

Chi-Nan Wu*, Kuo-Hsin Hsiao and Tzu-Yi Liao
Geospacial Information Technology Lab., Energy & Resources Laboratories,
Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu, Taiwan, ROC
E-mail: 690398@itri.org.tw

ABSTRACT

Rice yield models, derived by means of multiple regression using NDVI, RVI and TVI indices transformed from SPOT and Duncan imagery, were adopted to predict and compare with actual yield of the normal and varied nitrogen fertilized paddies. Duncan imagery acquired on Apr. 18 and May 28, 2002 which were corresponding to maximum tillering stage and grain filling stage, respectively, were radiometrically calibrated and geometrically corrected before models development. Two yield models were derived for all imaged paddies and the varied nitrogen fertilized paddies, respectively, for each date. The results show that the yield RMS error derived from the two dates for all paddies models were 0.436 and 0.229 MT/ha, respectively, and the RMS error for the varied nitrogen fertilized paddies were 0.967 and 0.989 MT/ha, respectively. The error sources might be from yield sampling error and BRDF effect. On the other hand, the models developed from fy89 2'nd crop and fy91 1'st crop were employed to predict the yield of fy91 2'nd crop and fy92 1'st crop, respectively. The RMS errors of the yield estimated from multi-dated SPOT models for the fy91 2'nd crop were 0.738, 0.717 and 0.719 MT/ha, respectively, and the RMS errors of the yield estimated from multi-dated SPOT models for the fy92 1'st crop were 0.706, 1.409, 0.791 and 0.530 MT/ha, respectively. For the last case, when the outlier of #89 paddy, which was nitrogen deficient and none additional fertilization, was removed, then the RMS error of the yield was down to 0.437 MT/ha. In conclusion, it was found that the high resolution Duncan imagery was better for yield prediction when all paddies, including varied nitrogen fertilized paddies, were adopted for model development; however, as the previously developed SPOT models hadn't considered the paddies of varied nitrogen applications, the yield prediction was worse for those paddies. The following study this year will include those paddies for model development and yield verification.

Key words: Rice yield, Regression analysis, Remote sensing.

利用空載多波段資料推求水稻田蒸發散量之研究

劉說安*[1,2,3]、陳奕穎[2]、張子瑩[3]、徐誌豪[2]、申雍[4]、楊純明[5]、吳啓南[6]
[1]國立中央大學太空及遙測研究中心
[2]國立中央大學水文科學研究所
[3]國立中央大學太空科學研究所
[4]國立中興大學土壤環境科學學系
[5]行政院農業委員會農業試驗所農藝組
[6]工研院能源與資源研究所遙測與資訊研究室
E-mail: yueian@csrsr.ncu.edu.tw

摘要 ---------- 62
一、前言 ---------- 62
二、方法簡述 ---------- 63
三、結果與討論 ---------- 66
四、結語 ---------- 70
五、誌謝 ---------- 70
六、引用文獻 ---------- 70
ABSTRACT ---------- 72

利用空載多波段資料推求水稻田蒸發散量之研究

劉說安[1,2,3]、陳奕穎[2]、張子瑩[3]、徐誌豪[2]、申雍[4]、楊純明[5]、吳啓南[6]

[1]國立中央大學太空及遙測研究中心

[2]國立中央大學水文科學研究所

[3]國立中央大學太空科學研究所

[4]國立中興大學土壤環境科學學系

[5]行政院農業委員會農業試驗所農藝組

[6]工研院能源與資源研究所遙測與資訊研究室

E-mail: yueian@csrsr.ncu.edu.tw

摘要

利用空載高解析度、可見光與熱紅外光多波段資料，配合地面氣象站所量測得的氣象資料，針對台中縣霧峰鄉農試所的試驗田區進行蒸發散量估計。推估方法基於地表能量平衡方程式，反演的地表參數包含反照率(albedo)、地表溫度及標準差植被指數(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)。其中，對於地表溫度的部分，係利用 NDVI 推求熱紅外光波段的放射率，再利用史蒂夫波茲曼定律將亮溫(Brightness temperature)轉換爲地表溫度。至於潛熱通量與可感熱的分配，則以乾、濕控制條件配合推求。本研究中，利用 2003 年 04 月 28 號蒐集到具有充分乾、濕控制條件的影像，經由乾、濕控制像元決定了乾、濕控制曲線，並依該曲線決定影像中各像元潛熱通量與可感熱的分配比値，進而決定潛熱通量與可感熱通量，並與現場量測值做比較。證實透過多波段遙測資料推估潛熱通量與可感熱通量是可行的方法，更爲水文循環提供了良好的蒸發散量空間資訊。

關鍵字：蒸發散、水稻田、遙測、潛熱。

一、前言

(一)研究背景

在遙測資料應用方面，過去曾用衛星(Landsat、SPOT)資料遙測地表之蒸發散量(Bastiaanssen *et al.*, 1998；Roerink *et al.*, 2000；Boegh *et al.,* 2002)，但一般台灣農業田區範圍有限,因此空間解析度成爲使用衛星資料的參考指標,當衛載解析度不足時空載取而代之。而使用空載機具架設多頻譜系統儀器(DMSV-1)對於水稻田田區所做的蒸發散研究中指出,利用多光譜資料反演水稻田之蒸發散量具可行性(鍾等，2002)。故利用直昇機搭配 DUNCAN MS3100-CIR 多光譜數位成像儀並搭配熱紅外光濾鏡高光譜影像儀；獲得紅光、

綠光及近紅外光三個波段的資訊與熱紅外波段的資訊，因此共可獲得四個波段的資訊。

就作物生長環境而言，於生長營養狀態一致的情況下，作物亦會因是否有足夠的水分維持其生長，而改變其健康情況。一般而言，水稻對水之需求格外重要，水分之多寡直接影響稻穀產量。而土壤就有如會吸水的海綿一般，它提供了作物生長所需要的水分，因此土層深、淺與作物生長健康情形有關。且農試所曾對於試驗田區進行過土壤資料庫的調查(郭等，2002)，可獲得試驗田區的土壤資訊。

(二)研究目的

由於水分的供需多寡攸關於水稻的產量。因此欲透過空載多波段的遙測資料，推估水稻田區蒸發散量。而蒸發散量的反演過程，先前已由鍾等(2002)試推求過，但對於乾輻射控制包絡線的估計上無法獲得有效的控制像元；嘗試以大範圍的空拍攝影像，繪製地表溫度與地表反照率的散佈圖，從中尋找出乾輻射控制像元，推估出水稻田的蒸發散量。

希望利用氣孔孔度計(porometer)實測水稻田田區水稻葉面之蒸散量。將實測成果與模式所反演出來的蒸發散量做驗證，並評估利用Roerink *et al.* (2000)所提法展出來的 S-SEBI 模式的適用性。綜合比較反演出來的蒸發散量與實測葉面蒸散量，及有效土層深淺與蒸發散量的關聯性，以面的趨勢做為比較，並提出合理的解釋。

二、方法簡述

(一)能量平衡及輻射量平衡原理

在能量平衡原理中，忽略植物光合作用所需的能量及熱容量，所以淨輻射量扣除土壤熱通量後的輻射量會被用來加熱地表(可感熱)及蒸發散地表的水分(潛熱)。可感熱為地面和大氣間的傳導，潛熱則用於土壤蒸發及植物蒸散過程。而地表能量平衡的概念如(1)式：

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \tag{1}$$

上式中，R_n 為淨輻射[W/m²]，G_0 為土壤熱通量[W/m²]，H 為可感熱通量(sensible heat flux)[W/ m²]，λE 為潛熱通量(latent heat flux)[W/m²]。

在輻射量平衡原理中，淨輻射是總和所有長短波長的入射、出射能量作用的結果。當入射長、短波輻射扣除地表放射長波輻射及反射短波輻射後，所得輻射量即為淨輻射量，如(2)式：

$$R_n = K^{\downarrow} - K^{\uparrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \tag{2}$$

其中，$K^{\downarrow}$ 為入射短波輻射量[W/m²]，$K^{\uparrow}$ 為地表反射的短波輻射量[W/m²]，$L^{\downarrow}$ 為入射長波輻射量，來自雲層及大氣的貢獻[W/m²]，$L^{\uparrow}$ 為地表的放射長波輻射量[W/m²]。

(二)能量平衡項的求法

1.地表淨輻射量

主要是利用上述的輻射量平衡原理 $R_n = (1-r_0)K^{\downarrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow}$ 推求淨輻射量 R_n，其中 $K^{\downarrow}$ 與季節、所在緯度及時間有關，一般可由此三項參數算出，本研究以測值代入。$K^{\uparrow}$ 為 $K^{\downarrow} \times r_0$。$L^{\uparrow} = \sigma T_0^4$，但要有地表溫度的配合。$r_0$ 為地表反射率。$L^{\downarrow}$ 來自雲層及大氣的貢獻，可利用空氣溫度、蒸氣壓估計入射長波輻射量(Prata, 1996)：

$$\begin{aligned} L^{\downarrow} &= e_{sky}\sigma T_a^4 \\ e_{sky} &= \left\{1-(1+xi)\exp\left[-(1.2+3xi)^{0.5}\right]\right\} \\ xi &= 46.5(vap/T_a) \end{aligned} \tag{3}$$

式中 e_{sky} 爲大氣放射率[-]。vap 爲水汽壓[kpa]。T_a 爲氣溫[K]。

2.土壤熱通量

因爲試驗區域位於台中縣霧峰鄉，屬於植被密度大的區域，可根據 Bastiaanssen *et al.* (1998)提出完全以遙測地表溫度估計 Γ 的經驗式來預測 G_0 。此經驗式爲地表反照率、地表溫度和 NDVI 的函數，可表示爲：

$$\Gamma = T_0(0.0032 + 0.0062r_0)(1 - 0.978NDVI^4) \tag{4}$$

3.潛熱與可感熱通量

經由上述(第貳章第一節)得知，將淨輻射量扣除土壤熱通量獲得淨可用能量，其中一部份能量是提供給空氣造成溫度變化，稱之爲可感熱 H (sensible heat)；另外一部份是提供土壤中水氣蒸發與植物蒸散作用所需的能量，稱之爲潛熱 λE (latent heat)，爲本文研究的重點。

對於非均勻的地表而言，地表溫度與反射率之間存在某種關係，而此種關係可應用於決定地表的一些特性(Menenti *et al.*,1989)。假設於大氣條件爲穩定的狀態下，也就是氣壓與氣溫爲定値，地表反照率與地表溫的關係如下圖所示：

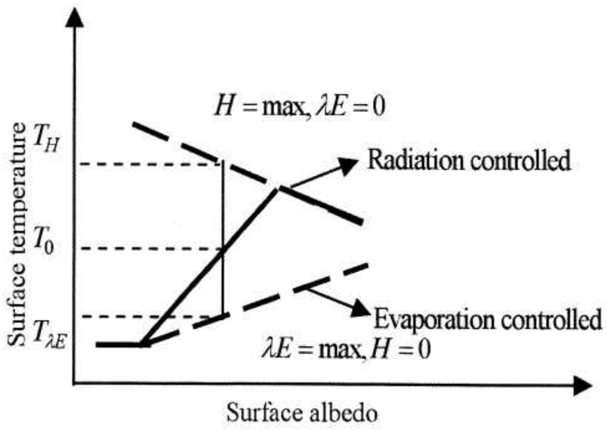


圖 1. 地表反照率與地表溫的關係圖。

圖中實線爲 S-SEBI 模式將淨輻射量分配成爲可感熱與潛熱的趨勢線。若將遙測影像中的像元繪制成該圖，圖中實線部分代表於某個地表反射率下地表溫度的平均値。

當地表反射率相當低時，地表溫度幾乎不隨著反射率而變化，其物理意義是代表著這像元應爲潮濕地、水面或爲植被覆蓋茂密的地區；大部分的能量都提供給水分蒸發成爲潛熱能，因此觀測得的溫度變化不明顯。對於觀測物而言隨著反射率增加，表示其含水率減少，相對可提供蒸發的水份減少，淨輻射量則被用來加熱地表成爲可感熱，然而隨著反射率增加地表溫度跟著遞增。但是增溫到達某個極限後，隨著地表反照率增加溫度卻反而下降了，原因是因爲相對於反射率大增地表所能獲得的淨輻射量下降；因此可以用來加熱地表的能量相對降低，溫度自然隨著反射率上升而遞減。

圖中上、下兩條直線分別爲乾控制與濕控制，乾控制表示所有的淨輻射能都被拿來加熱地表成爲可感熱；濕控制表示所有的能量都被拿來提供地表蒸發或植物蒸散水分成爲潛熱。分別以下列兩條方程式表示：

$$T_H = a_1 r_0 + a_0 \tag{5}$$

$$T_{\lambda E} = b_1 r_0 + b_0 \tag{6}$$

因此可定義蒸發散比値 (evaporation fraction)爲蒸發散能量除以淨可用能量：

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} \tag{7}$$

$$\Lambda = \frac{T_H - T_0}{T_H - T_{\lambda E}} \tag{8}$$

在 S-SEBI 模式中就是利用該蒸發散比値因子來決定潛熱與可感熱的分配比率。故只要

從地表溫度與反照率的關係圖中，將乾控制 T_H 與濕控制 $T_{\lambda E}$ 的回歸係數求得，即可定義可感熱與潛熱，如下所示：

$$H = (1-\Lambda)\times(R_n - G_0) \tag{9}$$

$$\lambda E = \Lambda\times(R_n - G_0) \tag{10}$$

(三)地表參數的反演

1.地表反射率

一般進行遙測地表資訊時，地表的反射率定義爲地表短波反射率。而此研究又使用空載機具獲得多波段資訊，因此大氣對輻射傳遞所造成的誤差很小故可忽略不計。受儀器限制此研究只考慮紅光、綠光及近紅外光三個波段的資訊。可經由空載機具上的 Duncan MS3100-CIR 多光譜數位成像儀獲得紅光、綠光及近紅外光三個波段的資訊。其 CCD 感測之光譜分布及波長頻寬如圖 2 及表 1 所示。

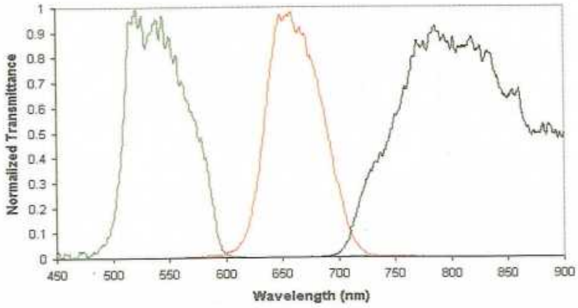


圖 2. MS3100-CIR **光譜感測分布圖**。(廖，2002)

表 1. MS3100CIR **中心波長及頻寬表**

Band	Center Wavelength	FWHM
Green	550 nm	40 nm
Red	660 nm	40 nm
IR	800 nm	65 nm

附註：摘自(廖，2002)

因此定義地表的反射率爲三個短波波段平均相加，如(11)式所示：

$$r_0 = \sum_{i=1}^{3}\frac{r_{0,i}}{3} \tag{11}$$

2.標準差值被指數 NDVI

標準差值被指數 NDVI 透過近紅外光波段與紅光波段的反射率定義爲：

$$NDVI = \frac{r_{nir}-r_{red}}{r_{nir}+r_{red}} \tag{12}$$

其中 r_{nir} 、 r_{red} 分別爲近紅外光波段與紅光波段的反射率。

3.地表放射率

本研究假設純植被及純裸土的放射率極值爲已知，利用 NDVI 和放射率間的關係找出極值間的內插函數。於 NDVI 求出後再以 NDVI 反演地表覆蓋比率最後估算地表放射率(Valor and Caselles, 1996)。

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_t P_t + \varepsilon_g P_g + \varepsilon_s P_s + d\varepsilon \tag{13}$$

因地表爲一個粗糙面，故考慮植物頂部(top)、植物的底部(ground)、植物的側邊(side)，分別以下 t、g、s 代表。P_t 、 P_g 、 P_s 爲感測器觀測到的覆蓋權重部分。而 $d\varepsilon$ 和粗糙地表內部反射到感測器的輻射有關，即顯示感測器觀測到的輻射會高於粗糙地形直接放射的輻射。將與植被的覆蓋比率有關，植被覆蓋比率 $P_v = P_l + P_s$ ，式(13)便可寫成：

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_g (1-P_v) + d\varepsilon \tag{14}$$

而混合植被與裸土覆蓋的 NDVI 可表示爲：

$$NDVI = NDVI_v P_v + NDVI_s (1-P_v) \tag{15}$$

則植被覆蓋比率可表爲：

$$P_v = \frac{NDVI-NDVI_g}{NDVI_v+NDVI_g} \tag{16}$$

其中 P_v 爲植被的覆蓋比率($NDVI_g$ 與 $NDVI_s$ 可由試區中 NDVI 的分佈範圍求得，一個爲純植被的 NDVI 另一個爲存裸土的 NDVI)。$d\varepsilon$ 求法過於複雜，在此不推導。如下試所示：

$$d\varepsilon = (1-\varepsilon_g)\varepsilon_v F(1-P_v) \qquad (17)$$

由於 $d\varepsilon$ 求法過於困難故以 $<d\varepsilon>$ 表示。因此地表放射率可以表示爲：

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_v(1-P_v) + 4<d\varepsilon>(1-P_v) \qquad (18)$$

上式中 ε_v 、ε_g 純植被及裸土的放射率，分別採用 0.985 及 0.960。$<d\varepsilon>$ 採平均值爲 0.015(Volor and Caselles, 1996)。

4.地表溫度

地表物接收太陽與大氣所提供的輻射能使物體產生熱能，此種能量的表現稱之爲地表溫度。而根據史蒂夫波茲面定律指出不同種的物體因其組成、含水率、顏色、表面粗糙的不同而具有不同的地表放射率。物體可依據其溫度與放射率可放射出不同輻射能。因此可以藉由遙測地表物放射出的長波輻射能，再搭配反演出的地表放射率推求出地表溫度。

根據史蒂夫-波茲曼定律(Stefan Boltzmann law)搭配反演出地表物的放射率，可以將空載儀器所獲得的亮溫 T_b 轉換成地表溫度 T_0。

$$L_{BB} = \sigma T_0^{\,4} = \varepsilon_0 \sigma T_b^{\,4}$$
$$\Rightarrow T_0 = \sqrt[4]{\varepsilon_0 \times T_b^{\,4}} \qquad (19)$$

上式中 $\sigma = 5.67\times10^{-8}[W/(m^2 * K^4)]$。爲史蒂夫-波茲曼常數。$\varepsilon_0$ 爲地表物的放射率。

由於空載資料中可見光與熱紅外光波段的空間解析度不同。故將熱紅外光波段的影像做重新取樣，使其解析度提高與可見光波段相同。於此種情況下利用可見波段所反演出的放射率配合相對應的亮溫值來估計地表溫度。其方法如下圖所示：

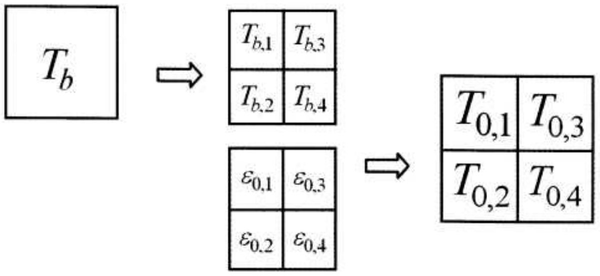


圖 3. 推估地表溫度的構想圖。

透過上述的構想能夠將空間解析度較低的熱影像轉換成空間解析度較高的熱影像，同時可以提升反演蒸發散量的空間解析度。

三、結果與討論

(一)遙測試驗田區

此次研究分別研究 2003 年 04 月 28 日與 2003 年 05 月 23 日兩次實行空拍作業所獲得的多波段影像。由於空拍作業所獲得的熱影像有幾何扭曲的現象如圖 4，故必須進行幾何校正。經過幾何校正的影像方可進行地表參數的反演，經幾何校正的影像成果如圖 5 所示。

但由於 05 月 28 日所獲得的空拍影像中，近紅外光波段因受光影反差強烈影響，部份地區產生飽和的現象，因此反演出的蒸發散量成效不彰故僅參考其結果，本次研究只著重於 04 月 28 日的部分。

氣象資料方面由農試所的氣象站所提供，由於空拍的時段約於當天中午到下午一點，故取氣象站下午一點所記錄的資料作爲大氣的背景條件。平均氣溫爲 31.8°C，相對溼度爲 62.7%，太陽短波日照強度爲 2.24[MJ/m^{2}hr]。

地表溫度方面係利用先前所介紹的原理，利用 Valor and Caselles(1996)所提出以 NDVI 推求熱紅外光波段的地表放射率，再利

用史蒂夫波茲曼定律反演出地表溫度。最後將地表反照率與地表溫度繪製成空間散佈圖，成果如圖 6。由此空間散佈圖中得知水稻田區像元值，落在影像中地表反射率較低的部分約在 0.2 至 0.5 之間；其他像元之反射率相較之下高出許多，可能是非試驗田的像元。使用此種同時具有乾、濕控制像元的影像，即可提供決定乾、濕控制包絡線的參考。依照此種特性所求出的包絡線如圖 7 所示，其迴歸包絡線定義爲下(20)、(21)兩式：

$$T_H = -4.980r_0 + 50.710 \tag{20}$$

$$T_{\lambda E} = 4.002r_0 + 41.574 \tag{21}$$

經由乾、濕控制包絡線即可定義影像中各像元潛熱與可感熱的分配比例。將所有試驗田區作爲參考所反演出來的蒸發散量如圖 8 所示。圖中估計的蒸發散量有負值產生，其物理意義是降雨或結露的情況產生。但不應於此試驗的時間點產生。解釋其原因乃因決定乾、濕控制包絡線時有些像元超出了包絡線控制的範圍，因此有極端的蒸發散負值產生。造成了估計上的誤差。若要避免該種誤差地產生就必須以更精準的反演模式去推求試驗田區的蒸發散量。以期獲得更佳的效果。

爲了探求水稻田區因爲有效土層深淺對於水稻田區的蒸發散量影響，因此參考(郭等，2002)對於農試所試驗田區土層分佈所做的調查圖互相比較。將 04 月 28 日、05 月 23 日(NIR 過飽和)與有效土層圖做比較，如圖 9 所示。

將此兩次空拍作業反演所獲得的蒸發散資料與試驗田區有效圖層深淺做比較，觀察其結果皆顯示蒸發散量較高的區域，對應有效土層之深淺皆顯示其土層較薄，其原因可能因爲淺層土壤有效體積熱容積較厚層土壤來得低。薄土層與厚土層相比具有較高的溫度梯度，因此反應出較出高的蒸發散量。

(二)實測試驗田區

由於試驗田區的蒸發散量實難估計，故擬採用儀器估計作物蒸散量的方式進行量測。蒸散作用爲水氣經由植物體發散於大氣之過程。

其過程包括：1.植物經由根部吸收水份，水分再經由根部的細胞壁外進入細胞壁內。2.水分於滲透入植物後存於株內運行。3.水分經由葉面上的氣孔而離開植物本體。此種過程維持著植物的新陳代謝，使植物得以順利生長(王及易，1999)。

本研究實測試驗田區部分，主要是利用 LI-COR 公司所生產的 LI-1600 Steady State Porometer 作爲實驗測量的儀器。儀器本身內部有預先填充乾燥劑與抽氣幫浦等多項裝置。其工作原理是先將儀器內的乾空氣之溼度、氣溫、葉溫與氣體流率做記憶，再將新鮮葉片置入量測孔徑內進行量測；儀器重複記錄進行葉面量測時的各參數，並計算葉面阻抗等參數。蒸散量可表爲空氣流率、葉面積、儀器中空氣水分子密度、實測葉面時儀器空氣中水分子密度的關係式。如式(22)所示：

$$E = (\rho_c - \rho_a)\frac{F}{A} \tag{22}$$

式中 E 爲蒸散率[$\mu g\ cm^{-2}\ s^{-1}$]，ρ_c 爲儀器中空氣水分子密度[$\mu g\ cm^{-3}$]，ρ_a 爲實測葉面時儀器空氣中水分子密度[$\mu g\ cm^{-3}$]，F 儀器內部所產生的初始空氣流率[$cm^3\ s^{-1}$]，A 爲葉面積[cm^{-2}]。其詳細的系統作業架構圖，如圖 10 所示。

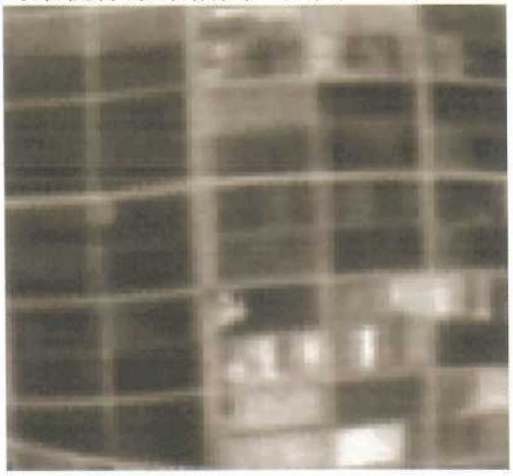


圖 4. 未經幾何校正的原始熱影像圖。

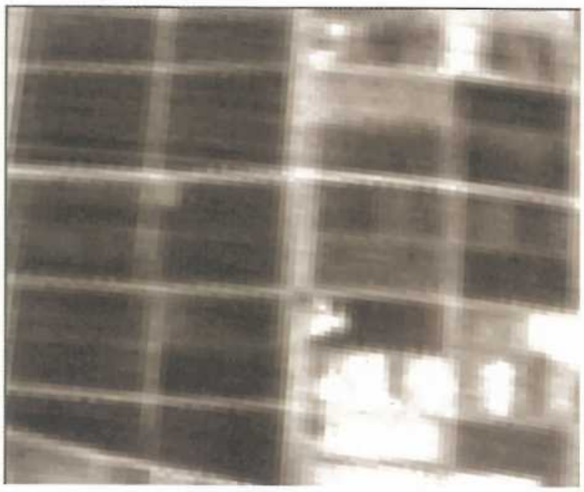


圖 5. 經過幾何校正後之熱影像圖。

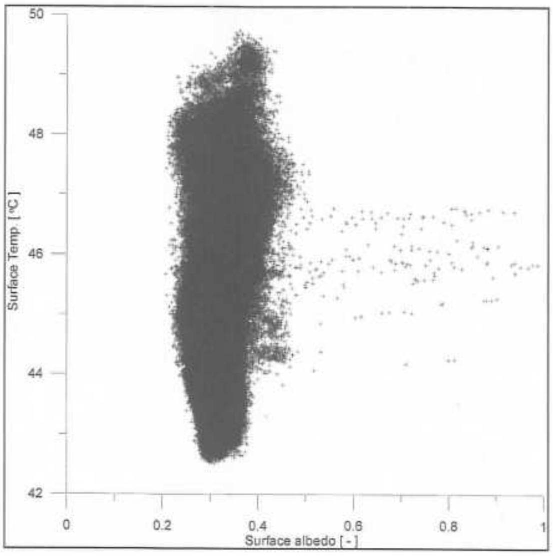


圖 6. 地表放射率與溫度的空間散佈圖。

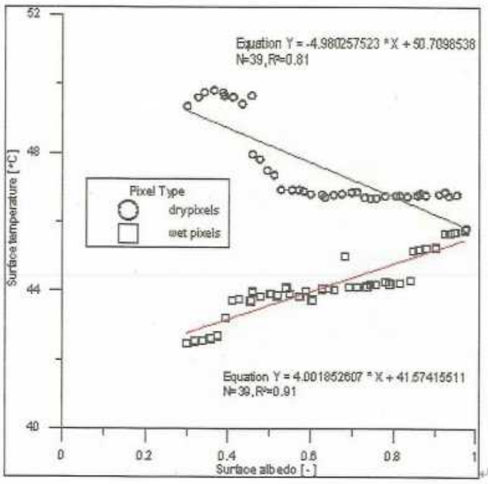


圖 7. 經由回歸分析所求得乾、濕控制曲線。

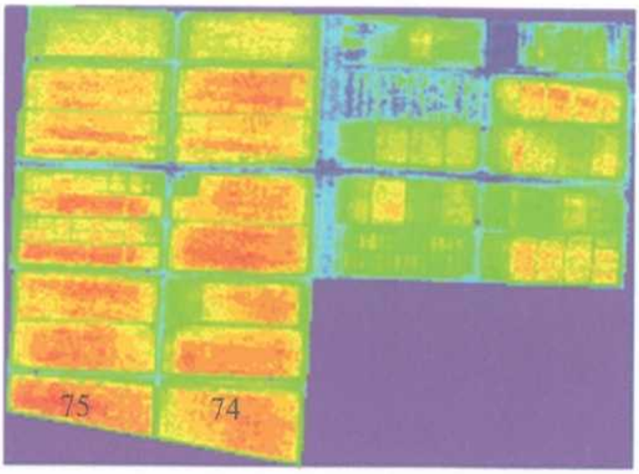


圖 8. 以 S-SEBI 模式估計所出研究區域 2003 年 04 月 28 日之蒸發散量。

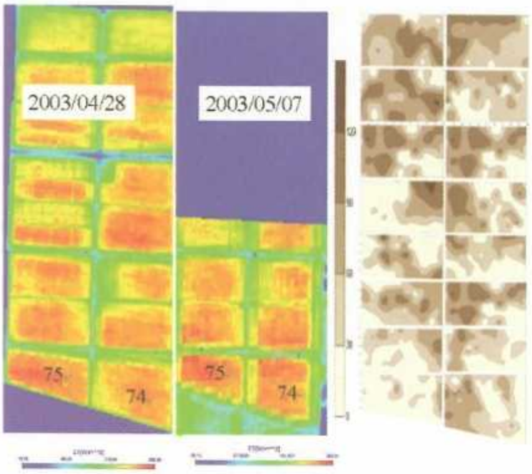


圖 9. 2003 年 04 月 28 日、2003 年 05 月 23 日之蒸發散量與有效土層深淺之比較圖。

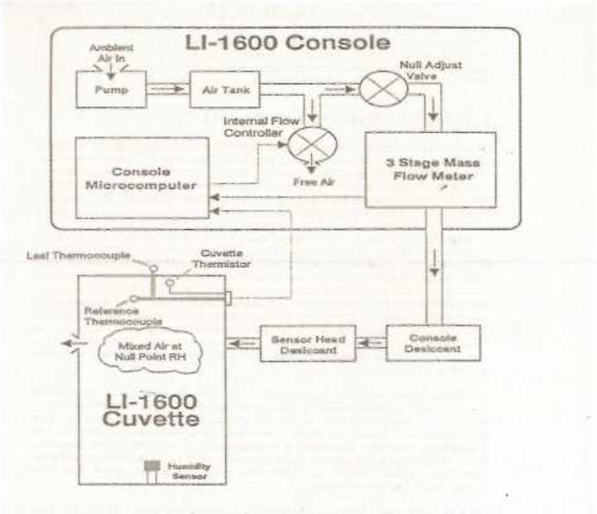


圖 10. LI-1600 系統作業架構圖。

分別將 74 號田區與 75 號田區做網格規劃，進行做物蒸散量的採樣。採樣點的設置如下圖所示：

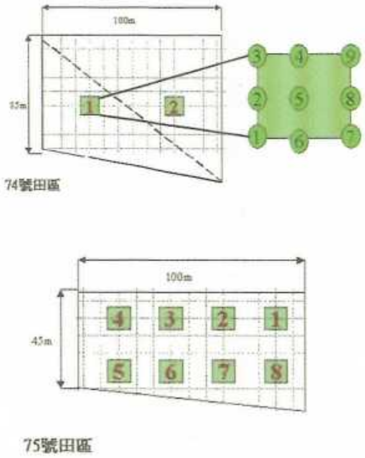


圖 11. 74 與 75 號田區所規劃採樣點。

圖 11 中方塊內的標號為採樣順序，74 號田區取 18 個點、75 號田區取 8 個點的資料。以上的網格點規劃乃依土層深淺的狀況做分配，74 號田圖層左右深淺不一致，故分別於左右各取一個樣區做採樣；75 號田土層較均勻故採平均分散的八個樣區採樣。

推求試驗田區水稻的蒸散量時，儀器所測得的蒸散量，為單位葉面積所貢獻的量；因此必須配合作物的葉面積指數，兩者相乘才可獲得水稻的蒸散量值。而水稻的葉面積指數(LAI)又會因不同的生長期而有所改變，此處引用(Shibayama *et al*., 1989)，對於水稻田 LAI 與生長期所做的關係圖，其關係如圖 12 所示：

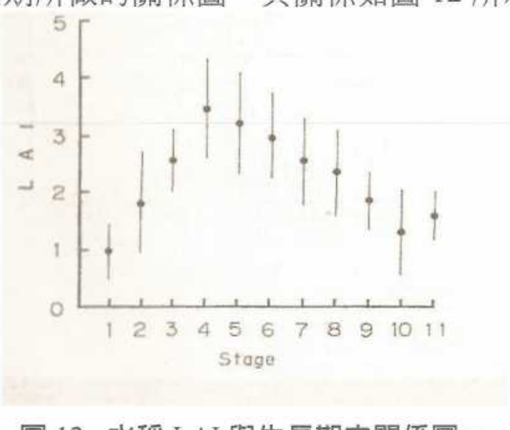


圖 12. 水稻 LAI 與生長期之關係圖。

圖中將水稻生長期分為十一個生長期距(Stage)，每個生長期距為十天。而第一次空拍作業執行為 2003 年 04 月 28 日，約為一期作的第八十至九十天，故取葉面積指數為 2.3(LAI=2.3)。進行採樣點蒸散量估算的參考。

將 75 號田區 8 個採樣的數據經過線性內插成 75 號田區面的資料如圖 13 所示：

圖 13. 75 號田區水稻實測葉面蒸散量。

同樣地將 74 號田區所採樣的 18 個點作處理，但其中剔除掉一點，因資料有誤。經過線性內插繪製成平面圖，如圖 14 所示：

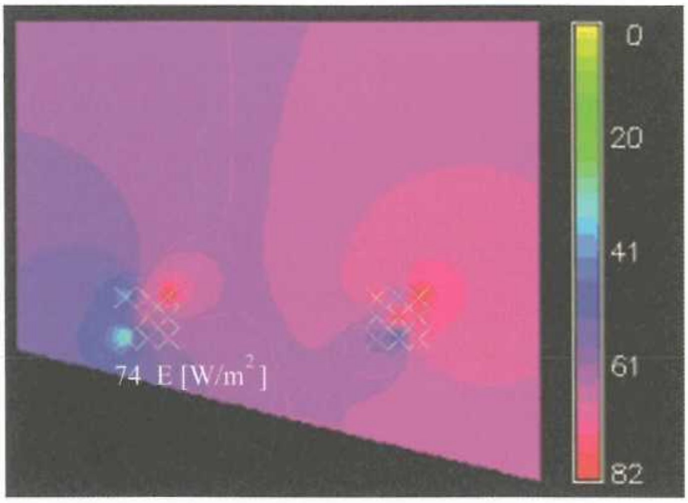


圖 14. 74 號田區實測水稻葉面蒸散量。

74 號試驗田區 14 個採樣數的據如下表所示：

表 2. 74 號試田水稻蒸散量實測值。

74 號田區 採樣時間:13:00P.M			
採樣編號	Transpiration [W/m^2]	採樣編號	Transpiration [W/m^2]
1	31.26	10	57.19
2	-	11	62.84
3	40.38	12	72.55
4	67.48	13	61.53
5	64.62	14	79.16
6	56.64	15	48.57
7	61.29	16	72.73
8	64.27	17	75.47
9	82.32	18	80.23

四、結語

(一)研究結論

綜合上述所有的研究內容，並探討所得的實測結果。我們可以獲得下列五點結論：

1. 於大氣條件穩定時，以地表能量平衡的觀念，配合多波段遙測資料求取地表蒸發散量具可行性。但欲利用 S-SEBI 模式求取水稻田的蒸發量時，必須注意乾、濕的選取。一般而言，水稻田田區水分較充足，可挑選成爲濕控制像元；而田埂區域的像元較缺乏水分，可挑選成爲乾控制像元。

2. 經由多波段遙測資料反演出的蒸發散資料顯示：75 號田區的蒸發散量確實高於 74 號田區。再配合有效土層資料顯示，土層較淺的作物區其蒸發散量有偏高的趨勢。

3. 經由地面實測 74、75 號田區水稻的葉面蒸散量顯示：75 號田區蒸散量空間分佈較爲平均，而 74 號田區則呈現右邊田區較高、左邊田區較低的趨勢。此結果與多波段遙測資料所反演出的蒸發散量趨勢相吻合。

4. 由反演出的蒸發散與有效土層資料中證實作物的蒸發散量，確實與該生長土層之深淺有相當大的相關聯性。兩者相比較，薄土層會反應出較高的蒸發散量。

5. 水稻對水之需求格外重要，水分之多寡直接影響稻穀產量。經本研指出 75 號田區的蒸發散量普遍偏高，推測應爲影響其產量的一個重要因子。

(二)建議事項

1.本研究嘗試以活動的水池內加冰塊，作爲溫度校正的控制像元，但因由於水池的範圍太小無法於熱影像中成像。建議可採取於某定點測溫，作爲溫度控校正的參考依據。

2.關於水稻田的葉面積指數(LAI)，乃參考(Shibayama *et al.*, 1989)對於水稻田 LAI 與生長期關係圖，並參照空拍作業時間求得。並未對水稻田的葉面積做實際的觀測。往後若進行 LAI 之測估計時，期可進行更準確度的破壞性估計法。

3.對於地表能量的分配採 S-SEBI 的方法估計，是依照溫度與反照率的關係圖，再求出蒸發散粗糙因子，反演出蒸發散量。期可參照其物理構想，推演出精確度更高的反演模式。

4.本研究對於水稻田之葉面蒸散量的估計，乃依照定位點逐時觀測，可能因採葉時間點不同、大氣條件的變化造成變異。因此可考慮以其他更好的方法取代。

五、誌謝

本研究承蒙行政院農委會「水稻田精準農業(耕)體系」研究計畫支持，另外也感謝工研院廖子毅先生提供空載機具 DUNCAN 資料。

六、引用文獻

王如意、易任。1999。「應用水文學」。p.167-168 頁。國立編譯館，臺北市。

郭鴻裕、劉禎祺、潭增偉等。2002。「應用土壤資料庫於水稻精準農耕土壤肥力分佈之探討」。p.139-152。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。行政院農委會農業試驗所，臺中縣。

葛國平。1990。「衛星山區植被雙向反射特性之研究」。國立中央大學大氣物理研究所

碩士論文，中壢市。
廖子毅。2002。「DUNCAN MS-3100 CIR 近紅外成像儀面參數率定報告」。工研院能源與資源研究所，新竹縣。
鍾譯靚。2001。「利用衛星遙測估算蒸發散量與熱通量之研究」。國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，中壢市。
鍾譯靚、劉說安、李天浩等。2002。「利用遙測推估農作物蒸發散量之研究」。p.65-78。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。行政院農委會農業試驗所，臺中縣。
Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land(SEBAL) 1 Formulation. J. Hydrology 212:198-212.
Boegh, E., H. Soegaard and A. Thomaen. 2002. Evaluating evapotranspiration rate and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. Remote Sens. Environ. 79:329-343.
Choudhury, B.J. 1989. Estimating evaporation and carbon assimilation using infrared temperature data. p.628-690. *In:* Vistas in Modeling, in Theory and Applications of Optical Remote Sensing. G. Asrar, ed. Wiley, New York.
Clothier, B.E., K.L. *Clawson*, P.J. Printer, Jr., M.S. Moran, R.J. Reginato and R.D. Jackson. 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. Agric. Forest Met. 37:312-329.
Daughtry, C.S.T., W.P. Kustas, M.S. Moran, P.J. Printer, Jr., R.D. Jackson, P.W. Brown, W.D. Nichols and L.W. Gay. 1990. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. Remote Sens. Environ. 32:111-124.
Kustas, W.P. and C.S.T. Daughtry. 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. Agric. Forest Meteorol. 49:205-223.
LI-COR Inc. 1989. LI-1600 Steady State Porometer Instruction Manual. Nebraska, USA.
Menenti, M., W.G.M. Bastiaanssen, D. van Eick and M.A. Abl El Karim. 1989. Linear relationships between surface reflectance and temperature and their application to map evaporation groundwater. Adv. Space Res. 9(1):165-176.
Menenti, M. and B.J. Choudhury. 1993. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. p.561-568. *In:* Proceedings of IAHS conference on Land Surface Processes. IAHS Publ., No. 212.
Oevelen, van, P.J. 1991. Determination of the available energy for evapotranspiration with remote sensing. M. Sc. Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands. 68pp.
Prata. 1996. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 122:1127-1151.
Roerink, Su, Menenti. 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. Phys. Chem. Earth (B) 25:147-157.
Shibayama, M. and T. Akiyama. 1989. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass. Remote Sens. Environ. 27:119-127.
Wan, Z. and J. Dozier, J. 1989. Land –surface temperature measurement from space: Physical principles and inverse modeling. IEEE Trans. Geos. Remote Sens. 27:268-278.

Airborne Remote Sensing of Evapotranspiration over Rice Paddy

Yuei-An Liou[1,2,3], Yi-Ying Chen[2], Tzu-Yin Chang[3], Zui-Hao Hsu[2], Yuan Shen[4], Chwen-Ming Yang[5] and Chi-Nan Wu[6]

[1] Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University, Chungli, Taiwan

[2] Institute of Hydrological Sciences, National Central University, Chungli, Taiwan

[3] Institute of Space Sciences, National Central University, Chungli, Taiwan

[4]Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan

5Division of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan

[6]Energy & Resources Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Chutung, Taiwan

E-mail: yueian@csrsr.ncu.edu.tw

ABSTRACT

This paper presents a retrieval scheme for the remote sensing of evapotranspiration (ET) over rice paddy. To perform the retrieval, high-resolution airborne imagery of multi-spectral visible and thermal infrared data, and ground-based meteorological measurements are utilized. The ET retrieval scheme is based on the basic principal of surface energy budget, which is a result of balance among longwave and shortwave radiation, latent heat, sensible heat, and energy flux into the ground. To partition the latent and sensible heat fluxes of interest from the energy balance equation, three basic parameters are of most concern, including albedo, surface temperature, and normalized difference vegetation index (NDVI). The NDVI and albedo can be easily derived from the visible and near infrared spectral data, while the surface temperature can be determined through the analysis of the infrared data with the Stefan Boltzmann law. From the airborne imagery taken on 28 April 2003, we observe very good dry and wet pixels that can be easily corresponded to the radiation and evaporation controlled criteria, respectively, and, hence, for the further use in defining the evaporative fraction needed to partition sensible and latent heat fluxes from the net energy flux. The derived ET is compared with the *in situ* measurements.

Key words: Evapotranspiration, Rice, Remote sensing, Latent heat flux.

水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術

申雍*[1]、李裕娟[2]、章國威[1]、羅正宗[3]、姚銘輝[4]、陳仁炫[1]
[1]國立中興大學土壤環境科學系
[2]行政院農業委員會農業試驗所農藝組
[3]行政院農業委員農業試驗所嘉義分所農藝組
[4]行政院農業委員農業試驗所農工組
E-mail: yshen@nchu.edu.tw

摘要 -- 74
一、前言 -- 74
二、稻株氮營養遙測模式之建立與測試 -- 75
三、簡易高光譜影像系統之研發與應用 -- 77
四、手持式稻株感應器之研發與應用 -- 78
五、結語 -- 79
六、誌謝 -- 79
七、引用文獻 -- 79
ABSTRACT-- 80

水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術

申雍*[1]、李裕娟[2]、章國威[1]、羅正宗[3]、姚銘輝[4]、陳仁炫[1]

[1]國立中興大學土壤環境科學系

[2]行政院農業委員會農業試驗所農藝組

[3]行政院農業委員農業試驗所嘉義分所農藝組

[4]行政院農業委員農業試驗所農工組

E-mail: yshen@nchu.edu.tw

摘要

水稻是臺灣地區栽培面積最廣的糧食作物，而氮肥是提高和穩定水稻生產最重要的肥料，但是在水稻生育初期很難以目視方法判別稻株的氮營養狀況，利用遙感探測技術可以提供田間稻株氮營養狀況空間分佈的資訊，是實施水稻精準農耕管理的基礎。「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫在「水稻精準農業(耕)體系之研究」中，負責利用遙感探測技術提供田間稻株氮營養狀況的空間分佈資訊。在為期四年之研究中，本計畫由測定水稻植被反射光譜的基礎工作出發，首先確認 $dR/d\lambda|_{735}$ 除可以分辨稻株體內氮素的濃度外，也具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力。進而利用 $dR/d\lambda|_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於臺北、臺中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證，測試結果均指出所建立的稻株氮營養遙測模式可以快速鑑別田間穗肥施用期間稻株的氮營養狀態，足以提供做為田間穗肥精準施用的依據。為能將該遙測模式實際應用於獲取田間稻株氮營養之空間分佈圖，本計畫同時開發出一套簡易高光譜影像拍攝系統，可依田間作業需求掛載於高空作業車或直昇機上。實際測試結果指出，此套簡易高光譜影像拍攝系統已達到實用的程度，可適時提供水稻穗肥精準施用所需之田間稻株氮營養空間分佈圖。本計畫也另行研發手持式的稻株氮營養狀況感應器一套，能立即獲知測定地點水稻的氮營養狀況，除可用於田間氮營養狀況空間分佈調查外，還可與目前之人工施肥作業結合組成實用的穗肥精準施用系統。

關鍵詞：水稻(*Oryza sativa* L.)、氮素、植被指數、高光譜影像、波段濾鏡、精準農業。

一、前言

氮肥是提高和穩定水稻生產最重要的肥料，但也是最不容易正確施用的肥料，因為即使水稻在生育期中吸收等量的氮素，但由於吸收的時期不同，稻株的型態和產量構成要素常常不同，產量也隨之變動。為能控制水稻氮肥之供給，目前的肥培管理雖已將水稻氮肥分成基肥、2-3 次的追肥和穗肥施用，但仍多憑農

民個人之經驗決定施肥的時間與用量，尚不能達到依稻株體內氮營養狀況而施用的精準管理。由於水稻是臺灣地區栽培面積最廣的作物，若能採用精準的肥培管理，適時適量的施用氮肥，除了具有提高稻作產量和施肥的經濟效益外，更可以減少非點源的污染，也具有維護生態環境的積極意義。

爲能及時偵測田間稻株的氮營養狀態，並提供田間稻株氮營養狀態之空間分佈圖，俾能達成精準施用氮肥之目標，因此於「水稻精準農業(耕)體系之研究」專案科技計畫中，設置「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫，爲屬於「水稻生育狀態與環境監測系統」下四個子計畫之一。「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫所設定的研發目標爲(1)監測穗肥施用時期水稻植被反射光譜和相對應之稻株的氮營養狀態，建構可迅速檢測稻株氮營養狀況的遙測模式，(2)開發可搭載於不同遙測載台(手持、高空作業車、直昇機)之感測系統，希望以前瞻性的眼光，致力於研究與發展偵測田間稻株的氮營養狀態所需之關鍵知識、技術與組(元)件，俾利進行田間稻株氮營養狀況空間分佈調查，提供作爲穗肥精準施用管理之依據。以下乃將該計畫四年來的研究成果作一綜合整理，說明本子計畫已獲得之成果。

二、稻株氮營養遙測模式之建立與測試

遙測技術主要利用植被的反射光譜間接推測作物的生育性狀，必須有適當的遙測模式才能將植被的反射光譜資訊轉化成所需的物理量。因此，欲瞭解稻株體內的氮營養狀態，首先必須獲得稻株氮營養狀態由充分至缺乏狀態下的植被反射光譜地眞資訊，並配合植體化學分析結果，才能將植被反射光譜中的細微變化，經由統計分析的步驟，逐步歸納建立適用的稻株氮營養遙測模式。所以研究開始之初，就先在農委會農業試驗所之水稻精準試驗田區和農業試驗所嘉義分所之溪口試驗農場，設立以不同氮肥施用量處理的水稻樣區，定期利用可攜式光譜儀量測不同氮營養狀況下水稻植被的反射光譜，並據以建立所需的遙測模式。此類地眞光譜的測定工作，在四年研究期間一直持續進行，以累積受不同年期氣候環境條件影響之水稻植被反射光譜的可能變化範圍，俾供作爲修正遙測模式參數使用。

不同氮肥處理水稻植被之典型反射光譜示於圖 1，反射光譜在可見光段非常接近，因此在田間通常不易以目視方法區別稻株的氮營養狀況；近紅外光段的反射值則隨氮肥用量之增加而升高，此與氮肥供應充足之水稻試區，其分櫱數和葉面積都顯著增加有關。因此，氮肥處理效應將使得水稻植被反射光譜在紅光段和近紅外光段的反射值差距增大，進而導致紅光段與近紅外光段地帶的斜率變化加劇(申等，2000)。

在建立稻株氮營養遙測模式之初，曾先對多種光譜特徵測試其作爲模式參數的可能性，結果指出稻株體內之氮營養狀況可利用植被指數 SRVI、NDVI、和一次微分值 $dR/d\lambda|_{735}$ 等特徵值進行鑑別(表 1)，但是 SRVI 和 NDVI 只能區別稻株體內氮素是否嚴重缺乏，$dR/d\lambda|_{735}$ 則可以分辨稻株體內氮素的濃度。由於農民栽培水稻都會施用肥料，因此採用精準農耕時所需的稻株氮營養鑑別技術必須能區別施肥處理間的差異。在各種鑑別方法中，僅有一次微分的值可以突顯出不同處理間的差異；此外，一次微分也具有去除土壤背景反射干擾之功能，因此選用 $dR/d\lambda|_{735}$ 作爲鑑別稻株體內氮營養狀況的特徵值以開發相關的遙測模式(申等，2000)。經多年之測試與修正(申等，2001；李等，2002)，式(1)爲目前所使用之稻株氮營養遙測模式。

$$N\% = 0.151 + 187.82\ dR/d\lambda|_{735} \quad (1)$$

Table 1. Comparisons of characteristic indices to identify nitrogen status of rice plants applied at different rates (kg N ha^{-1}) of nitrogen fertilizer. (from Shen, *et al*. 2000)

	3 week			6 week			9 week		
	0	90	180	0	90	180	0	90	180
Indices									
SRVI	2.6	8.0	8.2	5.8	10.3	10.2	6.6	12.0	12.5
NDVI	0.44	0.78	0.78	0.71	0.82	0.82	0.74	0.85	0.85
$dR/d\lambda^{a}\|_{735}$	1.43	3.78	4.16	3.53	5.96	6.01	3.90	5.26	6.69
Distribution									
SRVI	31	97	100	57	100	100	53	96	100
NDVI	56	99	100	86	100	100	86	100	100
$dR/d\lambda\|_{735}$	34	91	100	59	99	100	58	79	100

a: $dR/d\lambda|_{735}$ ×1E3

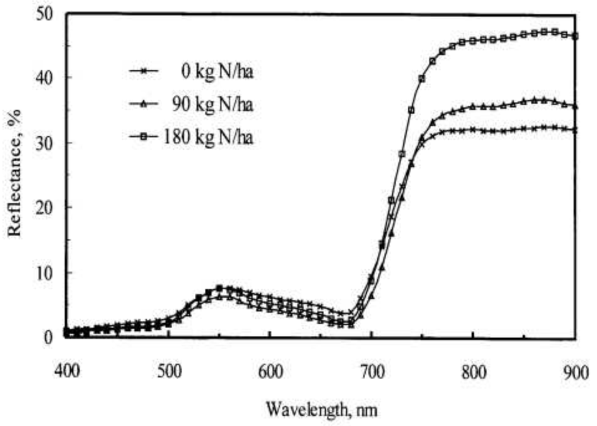


Fig 1. Typical reflectance spectrum of rice canopies at different nitrogen fertilizer application rate. (from Shen *et al*., 2000)

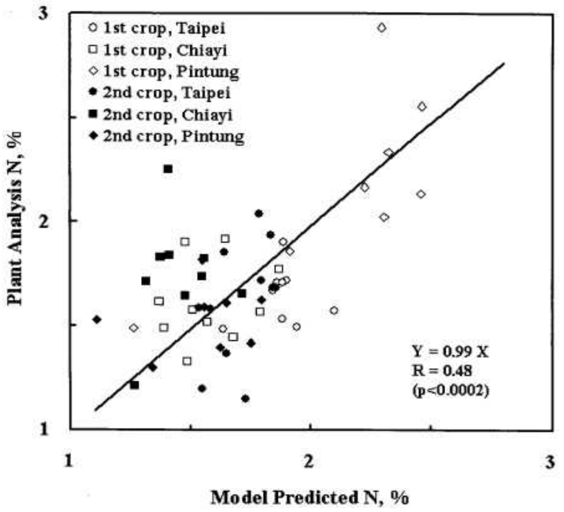


Fig 2. Results of validation tests conducted in 2002 at 3 sites for evaluating the remote sensing model to detect nitrogen status within rice plants.

為驗證該模式在不同年期與地區的適用性，2002 年一、二期作則於臺北、嘉義和屏東三地區同時進行不等量氮肥處理試驗。驗證結果指出，由遙測模式所推估之稻株體內氮濃度與相對應之植體化學分析值，均呈現 1:1 的線性相關與分佈(圖 2)，顯示所研發之稻株氮營養狀況遙測模式具有適用於不同地點、不同年期、與不同期作的能力。殘差分析則顯示利用遙測模式推估植體氮濃度的準確度應在±0.5%以內(圖 3)。至此，可以確認該模式已達實用之階段。

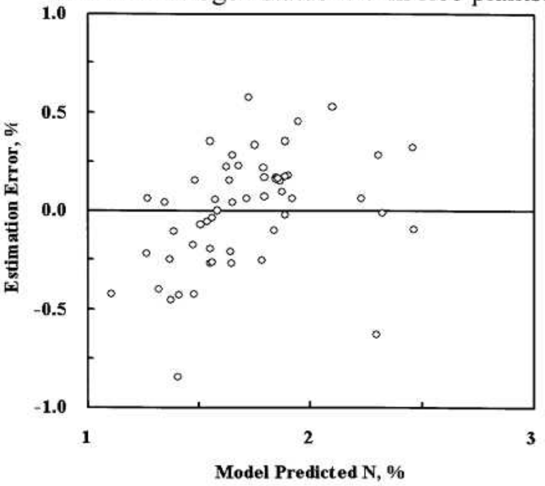


Fig 3. Residue analysis of the remote sensing model to detect nitrogen status within rice plants.

三、簡易高光譜影像系統之研發與應用

遙測模式建立後，仍需仰賴適當的遙感探測系統獲取所需的遙測影像，才能轉換成田間稻株氮營養狀態之空間分佈圖，俾供「水稻精準農業(耕)體系之研究」專案計劃下「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」做出對應之網格決策圖，再交由「精準農業自動化農機操作系統」實施精準的施肥操作。

本研究所研發之模式需使用 730nm 和 740nm 的遙測影像，計算每一像元之一次微分值 $dR/d\lambda|_{735}$ 後，才能換算成該像元稻株的氮營養狀態。但是，國內現有之資源衛星或航測飛機並無法提供所需之高光譜影像。國外雖已開發可裝設於飛機上的高光譜影像拍攝系統，但由於價格昂貴目前還未引進國內，因此必須自行研發所需的遙感探測系統。

申等(2002)首先研發可架設於高空作業車上之簡易高光譜影像拍攝系統(相片 1)，除可確認設計構想與系統性能外，並可藉以獲取田間必要的高光譜影像，以驗證由地面反射光譜測定所開發的遙測模式，而相關之研發經驗也可提供作爲研發以直昇機爲載具之感測器的基礎，圖 4 爲該系統作業的流程圖。圖 5 顯示簡易高光譜影像拍攝系統架設於高空作業車所得之田間氮營養狀況分佈情形，由圖中影像整體之灰度值分佈，即可以推斷何者所施用之氮肥用量較多，即使對田中以 90 和 135kg N ha^{-1} 處理之高施用量田區也能予以區別。圖中亦清楚顯示因施肥不均一所造成之稻株氮營養空間分佈不均一的情形。此外，由影像分析和以化學分析所得之氮濃度則具有良好的 1:1 對應關係正相關，顯示利用所建立的氮營養遙測模式，配合所研發的簡易高光譜影像拍攝系統確實可以區分田間水稻氮營養狀態的空間分佈情形。

Photo 1. The simplified hyperspectral imaging system operating on a mobile lift.

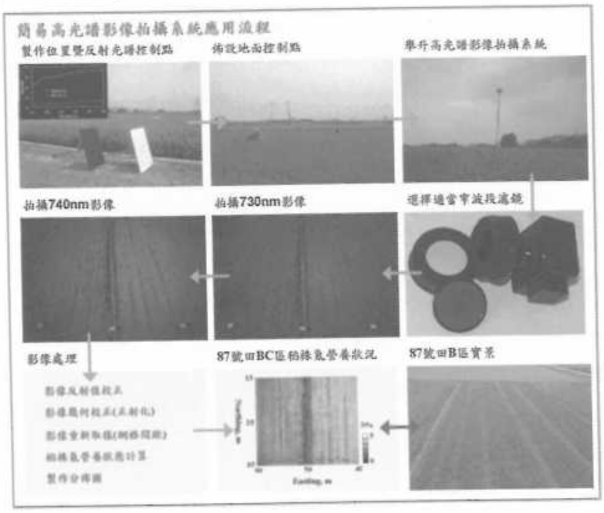


Fig 4. Operation procedures of the simplified hyperspectral imaging system.

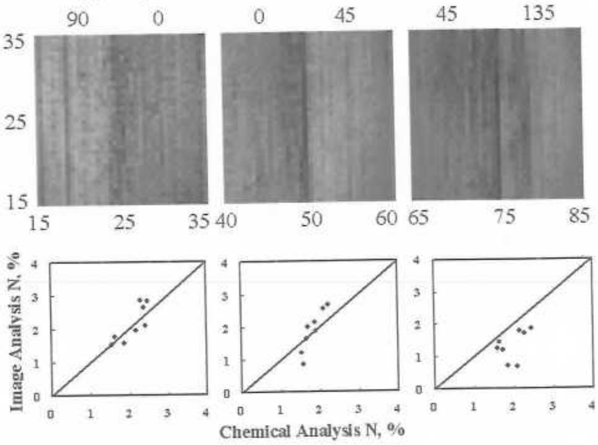


Fig 5. Maps of nitrogen status of rice fields, applied different amount of nitrogen fertilizers, using the simplified hyperspectral imaging system and results of the validation tests.

申等(2003a)又再進一步將該簡易高光譜影像拍攝系統予以改裝，利用直昇機作爲觀測載台，建立具有高機動性和高解析度的機載簡易高光譜遙測系統(相片 2)。圖 6 顯示機載簡易高光譜影像拍攝系統之氮變量試驗區田間氮營養狀況分佈情形，此圖之空間解析度高達 2m。圖 6 不僅顯示出不同氮肥用量小區的位置，亦清楚顯示同一小區中因施肥不均一所造成之稻株氮營養空間分佈不均一的情形。此外，由影像分析和以化學分析所得之氮濃度也具有良好的 1:1 對應關係正相關(圖 7)。以上結果顯示，所研發的機載簡易高光譜影像拍攝系統，配合以往所建立的稻株氮營養遙測模式，確實可以區分田間水稻氮營養狀態的空間分佈情形。應用機載簡易多光譜系統，曾於 2003 年一期作適時進行多次空拍作業，提供多種有關田間水稻生育情形、氮營養狀況、以及產量之空間變異分佈圖，除可被用於作爲田間穗肥精準施用之判斷依據外(申等，2003a)，也可作爲判釋土壤潛藏限制因子的輔助(申等，2003b)。

四、手持式稻株感應器之研發與應用

依照專案計畫之規劃，「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」將依據本研究所提供之田間稻株氮營養空間分佈圖，以及其他相關資訊，做出對應之網格決策圖，再交由「精準農業自動化農機操作系統」實施精準的施肥操作。但由於目前還未發展出實用的穗肥變量施肥機，因此又利用已確定之氮營養遙測模式，另行研發一種手持式的稻株氮營養狀況感應器，作業流程如圖 8 所示，除可用於田間氮營養狀況空間分佈調查外，可與目前的人工穗肥施用作業方式相結合，組成實用的穗肥精準施用系統(相片 3)。

Photo 2. Installing the simplified hyperspectral imaging system on a helicopter.

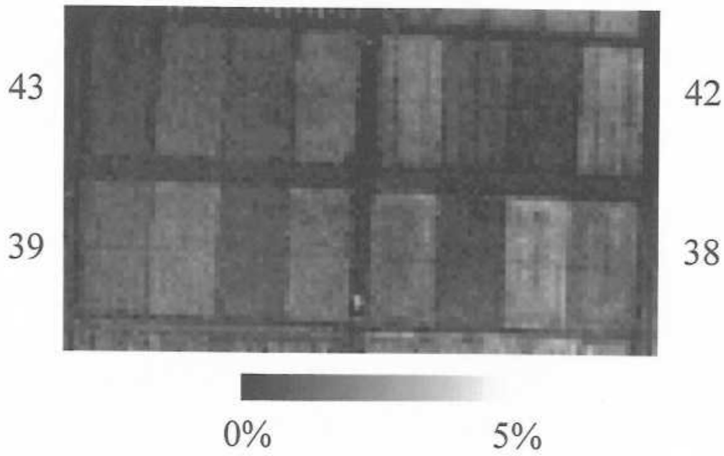


Fig 6. Maps of rice canopy nitrogen content for field plots 38, 39, 42, and 43, using helicopter mounted simplified hyperspectral imaging system

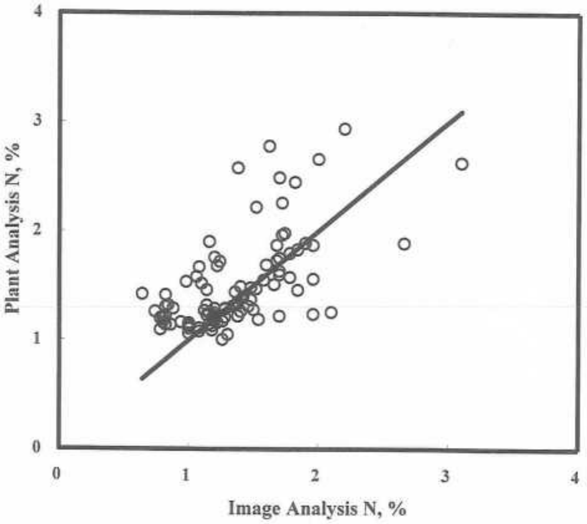


Fig 7. Comparisons of rice plant nitrogen content obtained from image analysis and from plant analysis.

在 2003 年一期作的研究規劃中，雖曾擬於嘉義分所溪口農場進行穗肥精準施用之試驗，以展示該系統對於節省穗肥之功效，然由於本期作氣候適當，田間水稻生長非常旺盛，試驗區內稻株體內之氮營養狀況並未達到可減施或不施穗肥的程度，因而尚無法提供節省穗肥效果之評比資料。

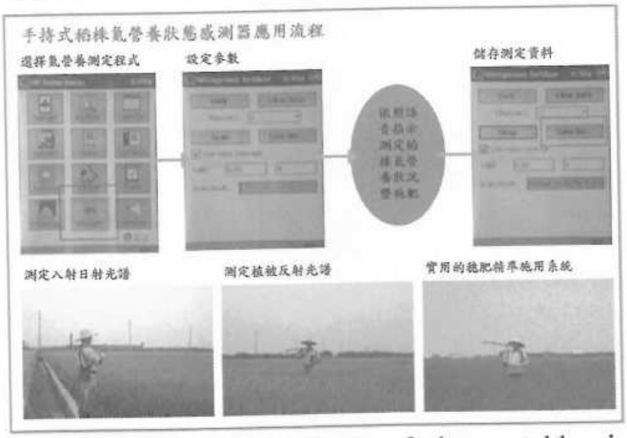


Fig 8. Operation procedures of the portable rice nitrogen status detecting system.

Photo 3. A more practical precision fertilizer application method by combining traditional method with a portable rice nitrogen status detecting system.

五、結語

以上研究成果顯示，進行水稻精準農耕所需之稻株氮營養遙測技術的基本架構，包括遙測模式和感測系統，都已依原定計劃時程成功且完整的發展出來。其中或許仍有改進的空間，但已達到實用的程度，可於進行水稻穗肥精準施用前，適時提供所需之田間稻株氮營養空間分佈圖。

六、誌謝

水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術相關研究，承蒙農業委員會編號 89 遙測-4.1-糧-41(4)，農業委員會農業試驗所編號 90 農科-4.1.1-農-C2(05)，91 農科-5.1.3-農-C2(05)與 92 農科-1.1.6-農-C1(03)等計畫經費補助，得以完成順利完成，謹申謝忱。

七、引用文獻

申雍、羅正宗、鄭世明。2000。稻株氮營養狀況遙測技術之建立。中華農業氣象 7:23-32。

申雍、李裕娟、章國威、羅正宗。2001。水稻氮營養之遙感探測技術。p.235-238。有機肥料與合理化施肥研討會。中華土壤肥料學會，臺中市。

申雍、李裕娟。2002。簡易高光譜影像拍攝系統之研發與應用。p.129-138。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

申雍、李裕娟、章國威、姚銘輝。2003a。機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用。p.97-104。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

申雍、陳仁炫、吳正宗、王鐘和、江志峰、劉禎祺。2003b。應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術。p.81-88。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

李裕娟、張愛華、申雍、章國威、楊純明、羅正宗。2002。稻株氮營養狀態檢測技術。p.101-112。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

Remote Sensing Techniques to Determine Nitrogen Status of Rice plants for Precision Management

Y. Shen*[1], Y.J. Lee[2], K.W. Chang[1], J.T. Lo[3], M.H. Yao[4] and J.H. Chen[1]

[1]Department Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC

[2] Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan

[3] Division of Agronomy, Chiayi Branch, COA, Chiayi, Taiwan, ROC

[4] Divsion of Agricultural Engineering, ARI, COA, Taichung, Taiwan, ROC

E-mail: yshen@nchu.edu.tw

ABSTRACT

Rice is the major crop in Taiwan. Nitrogen is the most important fertilizer to increase and stabilize yield of paddy rice. However, it is very difficult to identify nitrogen status of rice plants by visual inspection. Remote sensing technique can provide information regarding the spatial distribution of the nitrogen status of rice plants within the field and constitutes the basis of precision management of nitrogen fertilizer. The project is part of the precision cultivation system for rice and is responsible for providing field maps of nitrogen status of paddy rice using remote sensing techniques. During the four years' study, we first identified that $dR/d\lambda|_{735}$ index can distinguish the concentration of nitrogen status within rice plants. Therefore, the index is a much better indicator for delineating nitrogen status of rice plants then indices such as NDVI and SRVI. A remote sensing model based on $dR/d\lambda|_{735}$ was then developed in the second year. Validation tests, performed in the next two years, at Taichung, Chiayi, Taipei and Pintung, indicated that the developed model was neither site specific, nor year and crop season specific. Therefore, the model can serve as the basis for fast determining nitrogen status of rice canopy by remote sensing technique. A simplified hyperspectral imaging system was also developed in the project for acquiring needed field images. The system can be mounted on a mobile lift or on a helicopter based on field operation requirement. Field test indicated that the system is capable of providing the required nitrogen status map for precision application of fertilizer. A hand-held portable instrument was also built by employing the developed nitrogen model. This instrument is capable for measuring the nitrogen status in the field and serves as the basis for precision fertilizer application.

Key words: Rice(*Oryza sativa* L.), Nitrogen, Vegetation index, Hyperspectral image, Bandpass filter, Precision agriculture.

應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術

申雍*[1]、吳正宗[1]、陳仁炫[1]、江志峰[2]、劉禎祺[2]、王鐘和[2]
[1]中興大學土壤環境科學系
[2]農委會農業試驗所農化組
E-mail: yshen@nchu.edu.tw

摘要 ---------- 82
一、前言 ---------- 82
二、遙測影像選擇要點 ---------- 83
三、遙測影像輔助分析 ---------- 83
四、結語 ---------- 86
五、誌謝 ---------- 86
六、引用文獻 ---------- 86
ABSTRACT ---------- 88

應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術

申雍[*1]、吳正宗[1]、陳仁炫[1]、江志峰[2]、劉禎祺[2]、王鐘和[2]
[1]中興大學土壤環境科學系
[2]農委會農業試驗所農化組
E-mail: yshen@nchu.edu.tw

摘要

田間土壤性狀多具有空間分佈不均的特性，可以成爲導致田間作物產量發生空間變異的主要因素。應用遙測影像可獲得目標區內作物生育情形的空間分佈資訊，遠較以人爲方式於地面進行採樣、分析的調查方式來得經濟有效，且具有整體的空間觀念，更有利於進行相關的研判工作。本研究以農委會農業試驗所之水稻精準試驗田區爲例，探討應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之方法，並針對所分析之研究區域，提出可增加水稻產量之精準農耕操作方法的建議。本研究所開發的技術可與前一年度所發展之快速偵檢土壤性質空間分佈之技術結合，組成水稻精準農耕系統中，有關土壤環境空間變異特性的偵檢技術，也是發展精準農耕的重要關鍵技術。

關鍵詞：遙感探測、土壤性質、空間變異。

一、前言

「精準農業」是現代化農業科技的重要發展方向之一，因此受到農業界高度的重視。「精準農業」目前尙屬於發展初期，許多技術細節仍有待進一步之開發，但是其發展的大方向已很清楚，主要要求能精確掌握氣候和土壤之時間與空間的變異，以及其對農作物生育的影響，使能經由肥培、施藥等栽培管理手段，進行高效率的農業經營與管理，並減少由農業所產生之非點源污染(non-point pollution)，進而達到提高生產利潤，保護生態環境的目標，使農業得以永續發展(Blackmore *et al.*, 1995; Castelnuovo, 1995; Pierce and Sadler, 1997)。

田間土壤性狀多具有空間分佈不均的特性，可以成爲導致田間作物產量顯現空間變異的主要因素(Dobermann *et al.*，1994、1995；Wollenhaupt et al.，1997: Pan *et al.*，1997)。因此，比對田間土壤性質的分佈圖與作物生育性狀及產量分佈圖，將是發掘潛在土壤限制因子及分佈位置的重要方法之一(申，2001；Lillesand and Kiefer，1994；Long *et al.*，1995；Larscheid *et al.*，1997)。

在有關田間土壤性質分佈圖的繪製方面，由於對土壤樣品進行詳細的理化特性分析，不僅耗費時間且費用昂貴，而且若取樣數目太多、或取樣的位置不適當都將造成浪費，但是取樣太少又可能無法準確區別出土壤性狀之空間變異。因此，申等(2002)曾應用電磁感應技術和地理統計技術，結合傳統的土壤理化特性分析方法，建立快速偵測田間重要土壤

性質空間分佈之技術，不僅可以大幅減少土壤採樣的點數，且能協助選擇適當的位置進行採樣。該研究亦同時製作有多張農業試驗所水稻精準農耕共同試驗田區之重要土壤性質的空間分佈圖。

本研究著重於如何應用遙測影像，結合已完成之田間重要土壤性質分佈圖，開發利用遙測影像輔助判釋潛藏土壤限制因子分佈地區之技術，以期能與申等(2002)快速偵檢土壤性質空間分佈之技術結合，組成水稻精準農耕系統中，有關土壤環境空間變異特性的偵檢技術。

二、遙測影像選擇要點

選用遙測影像首先必須考量拍攝的時機。就水稻而言，理想的拍攝時機應為水稻生育之中期，約在最大分蘗期至抽穗期之間，因為此時段涵蓋水稻營養生長的末期及生殖生長的初期，屬於水稻生長最為旺盛的時段，不僅植被已完全覆蓋田區，葉片也多屬於完全展開的狀態，植被反射光譜應該含有充分的資訊可供解讀。而且，田間土壤若有限制因子存在，應該已有相當之影響時日可供顯現。此外，此一時段水稻植被反射光譜的動態變化也較為平緩，因此田間水稻的插秧日期即使相差數日，在遙測影像中也不會產生明顯變化，對影像判讀工作的影響程度可降至最少。

理論上，在不同光譜波段所拍攝的遙測影像越多，越能發掘更多的資訊。但在經費、以及可用之遙測載台和感測器之限制下，所選用之波段最好能明顯展示田間水稻生長的差異。就此點而言，近紅外光段的影像應該列為首選，因為植被在近紅外光段反射值的高低不僅直接與葉片之解剖結構和細胞膨壓，以及葉面積指數有關，也可間接反應許多環境因素的影響(Guyot，1990)。此外，植被近紅外光段的反射值也遠高於可見光段，因此較微小的光譜變化也能明顯表現。

遙測影像的空間解析度也必須列入考量，由於田間土壤性質的空間變異尺度多以 m 或 10m 為單位(Dobermann *et al.*，1994；1995)，因此影像的空間解析度最好能達到公尺的等級，才容易作為辨識田間土壤限制因子空間分佈位址的輔助工具。就此點而言，目前國內常用之 SPOT、Landsat 等資源衛星的影像將有空間解析度不足的問題，未來華衛二號的空間解析度可能勉強適用，但是最好還是採用航測的影像。國內農航所的多譜掃描儀在航高 2000m 時，可有 4m 的空間解析度；申等(2003)發展的機載簡易多光譜影像拍攝系統在航高 600m 時，可達 70cm 的空間解析度。

三、遙測影像輔助分析

首先利用於幼穗形成期(92 年 5 月 7 日)由機載多光譜影像系統取得精準試驗田區的近紅外光段(800nm±5nm)反射值分佈圖(圖 1)，此圖具有 2m 的空間解析度。由於當期作有部分田區已被規劃進行多種肥料變量施用試驗，為避免不同試驗處理造成判釋上的困擾，因此僅選擇相鄰且屬於正常管理的 74、75、76、77、79 五塊田區進行分析，面積共約 2.7ha。

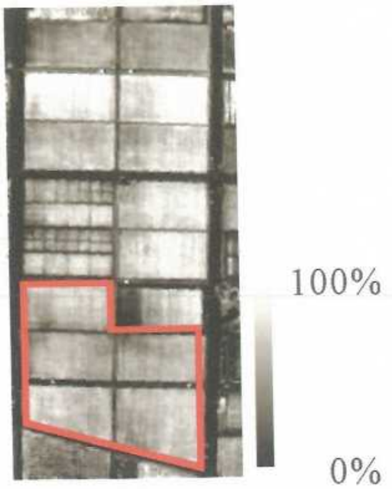


Fig. 1. Map of rice canopy reflectance at 800nm for field plots from no.74 to 89 at TARI on May 7, 2003.

近紅外光段反射值高代表水稻生長較旺盛，因此先依據反射值之高低進行分類，經驗顯示若將類別分的太多，通常不易呈現明顯的空間分佈型態。在本次研究中，以分成三類最為理想(圖 2)，圖中明顯可見跨田區的空間分佈情形。為瞭解由近紅外光段反射值所劃分之不同區域的土壤性質是否呈現變化，則依據申等(2002)所進行的 12.5m x 12.5m 網格土壤樣點位置，於分類屬於高反射值和低反射值的區域中各選取 8 點，各區域土壤性質的統計資料示於表 1。其中差異較明顯的土壤性質分別為，高反射值之區域表土中石塊含量高，土壤電磁感應讀值較低，短期乾旱條件下表土中的水分含量較低，土壤呈微酸性，有機物含量較高，有效性磷的含量較高，有效性鈣的含量則較低。低反射值之區域表土中幾乎沒有石塊，土壤電磁感應讀值較高，短期乾旱條件下表土中的水分含量較高，土壤呈中性至微鹼性，有機物含量較低，有效性磷的含量較低，有效性鈣的含量較高。

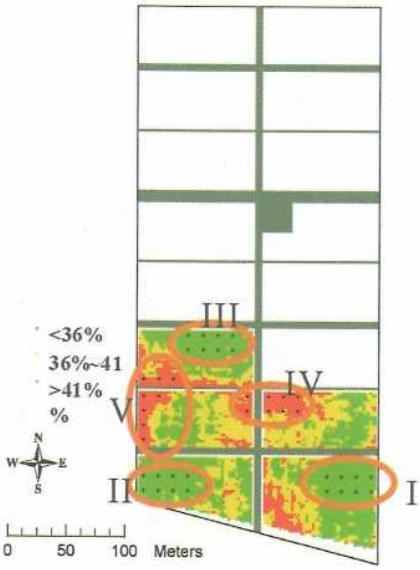


Fig. 2. Spatial distribution of rice growth classified according to 800nm reflectance. Roman numerals indicated regions where soil properties were further analyzed in Table 1.

Table 1. Comparison of soil properties at regions delineated according to the reflectance of rice canopies at 800nm.

Item[1]	High reflectance Region					Low reflectance Region				
	I	II	III	Mean[2]	SD[2]	IV	V	Mean[2]	SD[2]	Ratio[3]
800R	45.5	46.6	45.5	45.9	1.7	29.8	32.4	31.1	3.5	0.18
V0	17.5	25.0	22.4	21.6	3.9	23.9	25.1	24.5	3.3	1.26
H0	17.5	23.9	23.0	21.5	3.3	24.0	25.0	24.5	3.1	1.05
TDR	16.6	19.6	26.7	18.1[4]	3.6[4]	23.8	24.1	23.9	3.4	0.60
RD	27.5	22.9	39.5	30.0	20.0	56.0	44.9	50.4	19.0	0.95
Sand	27.2	25.9	28.5	27.2	2.7	33.5	25.4	29.5	5.5	1.81
Silt	42.9	48.0	47.2	46.1	3.3	44.4	47.0	45.7	3.8	10.18
Clay	29.9	26.1	24.3	26.8	3.1	22.0	27.6	24.8	3.7	1.74
EC	68.8	139.0	87.4	98.4	39.0	124.5	103.4	113.9	38.8	2.50
pH	5.6	6.3	5.5	5.8	0.6	7.3	6.7	7.0	0.7	0.51
OM	1.8	1.9	2.0	1.9	0.1	1.5	1.6	1.6	0.2	0.44
M3P	37.5	30.7	71.3	46.5	18.7	23.2	35.4	29.3	9.2	0.81
M3K	36.2	33.1	51.8	40.4	10.1	35.1	35.0	35.1	12.0	2.09
M3Ca	797.1	879.2	726.7	801.0	145.3	1113.0	1052.4	1082.7	321.8	0.83
M3Mg	155.3	131.1	145.0	143.8	15.4	126.7	145.6	136.2	31.5	3.07

1. 800R: Reflectance at 800nm (%); V0: EM38 in vertical position (mS m^{-1}); H0: EM38 in horizontal position (mS m^{-1}); TDR: TDR reading (V/V %); RD: Depth to rock (cm); Sand: Sand fraction (%); Silt: Silt fraction (%); Clay: Clay fraction (%); EC: 1:5 (mS m^{-1}); pH: 1:1; OM: Organic matter (%); M3P, M3K, M3Ca, M3Mg: Mehlich – III extracted P, K, Ca, Mg (ppm)
2. All regions calculated together
3. Difference of mean/average of standard deviation
4. Not including region III

圖 3 為應用遙測影像所獲得之精準試驗田區稻株氮營養空間分佈圖(申等，2003)，圖中表明在近紅外光段反射值高的區域，稻株中的氮濃度較低；在近紅外光段反射值低的區域，稻株中的氮濃度則較高。圖 4 與圖 5 分別為應用遙測影像所獲得之精準試驗田區感熱和潛熱的空間分佈圖(劉等，2003)，圖中也表明在近紅外光段反射值高的區域，水稻植被的蒸發散量較高，葉面溫度較低；在近紅外光段反射值低的區域，水稻植被的蒸發散量較低，葉面溫度則較高。

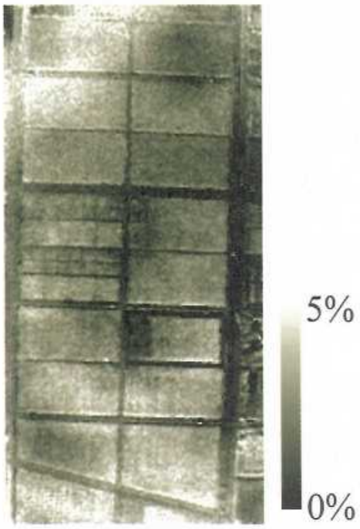


Fig. 3. Map of rice canopy nitrogen content for field plots from no.74 to 89 at TARI on April 28, 2003. (from Shen *et al.*, 2003)

由以上資訊，可推測在近紅外光段反射值高的區域，由於表土中混有較多之石頭，全區均勻施用基肥與追肥的結果，將使得土壤中的氮素濃度相對提高，又由於土壤中有效磷的含量也較高，且土壤呈微酸性，利於微量元素之吸收，因此水稻生長旺盛，導致植被近紅外光段的反射增加。由於水稻生長旺盛，在稀釋效應的作用下，稻株體內的氮濃度則較低，但植被之蒸發散量則提高，而蒸散冷卻的效應則導致植被葉溫的降低。在近紅外光段反射值低的區域，由於表土中幾乎沒有石頭，全區均勻施用基肥與追肥的結果，將使得土壤中的氮素濃度相對較低，又由於有效磷的含量也較低，且土壤呈中性至微鹼性，較不利於微量元素之吸收，因此水稻生長較差，導致植被近紅外光段的反射降低。由於水稻生長較差，在濃縮效應的作用下，稻株體內的氮濃度則較高，但植被之蒸發散量卻較低，植被葉溫也因而增高。

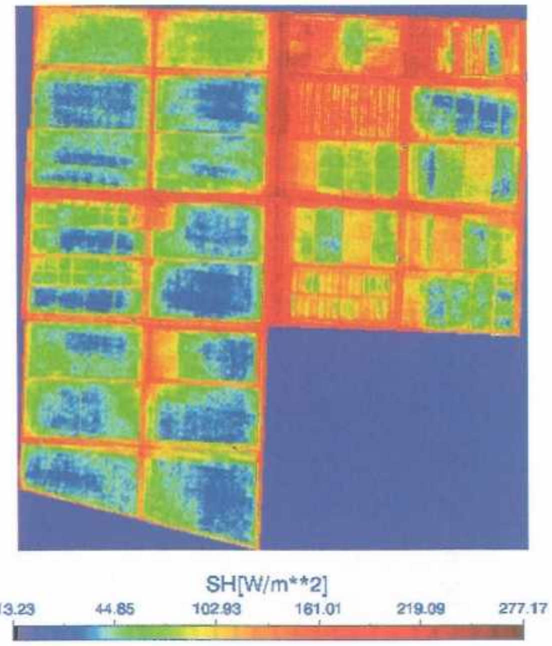


Fig. 4. Spatial distribution of sensible heat for Rice Precision Management Farm at TARI on April 28, 2003. (from Liu *et al.*, 2003)

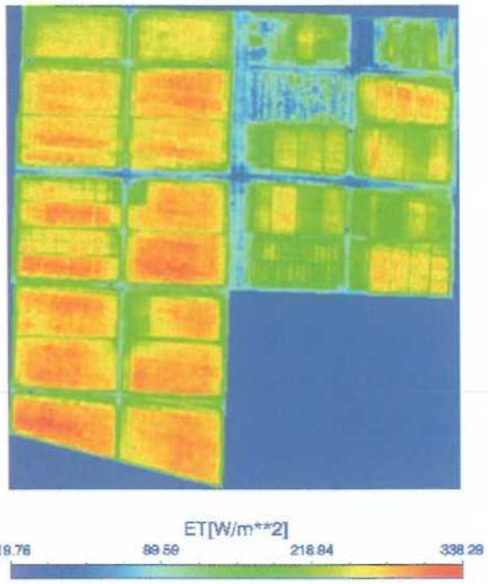


Fig. 5. Spatial distribution of latent heat for Rice Precision Management Farm at TARI on April 28, 2003. (from Liu *et al.*, 2003)

就應用精準農耕技術提高水稻產量之觀點而言，依據以上的分析結果，可對田間的實務操作提出以下之初步建議:對於近紅外光段反射值高的區域,保持目前基肥與追肥的氮素用量即可；對於近紅外光段反射值低的區域，則應適量提高基肥與追肥中氮素的用量。更詳細與準確的精準農耕實務操作修正,則仍有待本團隊中「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」的深入分析與探討。

四、結語

本研究已成功展示如何應用遙測影像輔助判釋潛藏土壤限制因子分佈地區之方法,可與前一年度所發展之快速偵檢土壤性質空間分佈之技術結合，組成水稻精準農耕系統中，有關土壤環境空間變異特性的偵檢技術,也是未來發展精準農耕的重要關鍵技術。

五、誌謝

土壤環境空間變異特性偵檢技術的相關研究，承蒙農業委員會農業試驗所編號 91 農科-5.1.3-農-C2(07)與 92 農科-1.1.6-農-C1(04)等計畫經費補助，得以完成順利完成，謹申謝忱。

六、引用文獻

申雍。2001。第八章 精準農業體系整合應用。p. 186-203。精準農業，陳俊明主編。國立中興大學農學院農業自動化中心編印，台中市。

申雍、吳正宗、張家銘、陳仁炫、江志峰、劉禎祺、王鐘和。2002。快速偵測田間重要土壤性質空間分佈之技術。p.30。農業試驗所 91 年度「水稻精準農業體系之研究」計劃成果研討會暨展示會手冊。

申雍、李裕娟、章國威、姚銘輝。2003。機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用。p.89-96。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，台中縣。

劉說安 陳奕穎 張子瑩 徐誌豪 申雍 楊純明 吳啓南。2003。利用空載多波段資料推求水稻田蒸發散量之研究。p.61-72。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，台中縣。

Blackmore, B.S., P.N. Wheeler, J. Moris, R.M. Moris and R.J.A. Jones. 1995. The role of precision farming in sustainable agriculture: A European perspective. p.777-793. *In*: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson ,eds. ASA, CSSA, SSSA.

Castelnuovo, R. 1995. Environmental concerns driving site-specific management in agriculture. p.867-880. *In*: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson (eds.). ASA, CSSA, SSSA.

Dobermann A., J.L. Gaunt, H.U. Neue, I.F. Grant, M.A. Adviento and M.F. Pampolino. 1994. Spatial and temporal variability of ammonium in flooded rice field. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1708-1717.

Dobermann A., M.F. Pampolino and H.U. Neue. 1995. Spatial and temporal variability of transplanted rice at the field scale. Agron. J. 87: 712-720.

Guyot, G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. p. 19-43. *In*: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven,

M.D. and J.A. Clark., eds. Butterworths.

Larscheid, G., B.S. Blackmore and M. Moore. 1997. Management decisions based on yield maps. http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/cpf.

Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer. 1994. "Remote Sensing and Image Interpretation". 3rd ed. John Wiley & Sons.

Long, D.S., G.R. Carlson and S.D. DeGloria. 1995. Quality of field management maps. p.251-271. *In*: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson, eds. ASA, CSSA, SSSA.

Pan, W.L., D.R. Huggins, G.L. Malzer, C.L. Douglas, Jr. and J.L. Smith. 1997. Field heterogeneity in soil-plant nitrogen relations: Implications for site-specific management. p. 81-99. *In*: "The State of Site Specific Management for agriculture". Pierce, F.J. and E.J. Sadler, eds. ASA, CSSA, SSSA.

Pierce, F.J. and E.J. Sadler, eds. 1997. The State of Site Specific Management for Agriculture. ASA, CSSA, SSSA.

Wollenhaupt, N.C., D.J. Mulla and C.A. Gotway Crawford. 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. p. 19-53. *In*: "The State of Site Specific Management for agriculture". Pierce, F.J. and E.J. Sadler, eds. ASA, CSSA, SSSA.

Locating Soil Limiting Factors as Assisted by Remote Sensing Images

Y. Shen[*1], J.T. Wu[1], J.H. Chen[1], C.F. Chiang[2], J.C. Liu[2] and C.H. Wang[2]
[1]Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC
[2]Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail:yshen@nchu.edu.tw

ABSTRACT

Soil properties are heterogeneous in the fields. These may result in the spatial variation of crop yields. Through remote sensing images, spatial distribution of crop growth in the field can be obtained in more efficient manner than traditional human survey. Besides, remote sensing images can provide a more integrate view of the field and are thus more useful in related analysis. In this study, the rice fields for precision management in TARI was taken as an example to illustrate the methods of using remote sensing images to assist identifying and locating the growth limiting soil factors. Preliminary suggestion regarding precision field management practices was also proposed to increase rice yield. The techniques developed this year, in conjunction with techniques for fast determining spatial distribution of soil properties at field scale, constitute the spatial variation detection scheme for soil environment. This is a key technique for precision farming.

Key words: Remote sensing, Soil properties, Spatial variation.

水稻精準農業體系
由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態
89-96, 2003

由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態

楊純明
行政院農委會農業試驗所農藝組
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 90

一、前言 ---------- 90

二、方法簡述 ---------- 91

三、結果與討論 ---------- 91

四、結語 ---------- 93

五、誌謝 ---------- 94

六、引用文獻 ---------- 94

ABSTRACT ---------- 95

由葉綠素測計估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態

楊純明
行政院農委會農業試驗所農藝組
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本研究調查2000年二期稻作至2002年一期稻作(計二年四期作)之水稻生育期間稻株葉片葉綠素及氮素含量，配合以葉綠素計讀值的量測，試以建立葉綠素計讀值與葉綠素及氮素之關係式，利用於估測和追蹤稻株之葉綠素及氮素狀態。試驗發現以不等量氮肥的施用將影響稻株之葉片之葉綠素總量及氮素含量，但是在相同等級下葉片之葉綠素總量、氮素含量或葉綠素計讀值均隨著稻株生育而呈現下降趨勢。稻株葉片之氮素含量與葉綠素總量可以直線正相關表示，一、二期稻作皆然，且兩期稻作資料可以合併分析，兩變數之間仍爲顯著直線正相關。試驗分析亦顯示，稻株葉片之葉綠素總量與葉綠素計讀值之關係可適用於直線相關，一、二期稻作之決定係數(R^2)分別爲 0.758 及 0.862，其合併分析亦爲顯著直線正相關。在葉片氮素含量與葉綠素計讀值的關係上，無論期作均爲顯著直線正相關，一、二期稻作之決定係數分別爲 0.574 及 0.439，合併分析產生兩期稻作共用的迴歸方程式 R^2 爲 0.411($P<0.0001$)。根據試驗結果，本研究採用的水稻品種臺農 67 號，建議可以利用葉綠素計讀值估測和追蹤稻株葉片之葉綠素與氮素狀態。

關鍵詞：水稻、葉綠素測計、葉綠素總量、氮素含量。

一、前言

水稻的生產同時受到遺傳組成及環境因素影響，在環境因子當中，農民主觀的栽培管理和肥料使用上的認知，相當程度的決定產量與品質。在生產過程所施用的肥料元素中，氮素是影響水稻生產的要素之一，其對水稻增產的效應超過其他營養元素的增補作用。欲獲得令人滿意的生產質量，必需多管齊下同時控制氮素肥料的適當施用時期、施用量與施用方法。

氮素肥料管理的重要性，牽涉到水稻的複雜生產環境，使其不易獲得預期的管理效果。雖然氮素的供給可以分別取自土壤、空氣及肥料等不同來源，然而在大多數情況下仍以外添氮肥爲主，而施加入土壤中的氮素因稻株生育的吸收利用及各種因素流失，因此需要視狀況定期或不定期的添補氮肥來供應稻株生育需求。所以，如何依照稻株的生育情形，予以適時適量適法的施用氮素肥料，乃稻田氮肥管理的首要課題。

又氮素是植物光合作用工廠葉綠體(素)的構成元素之一，水稻植體氮素狀態與葉綠素

含量的關係十分密切，於是以葉綠素含量來推估氮素狀態符合理論邏輯。依據李等(2002)試驗結果顯示，施用氮肥將促進稻株之氮素、葉綠素及生長性狀，改變植被反射光譜曲線變化，而稻株葉片氮素含量與葉片或地上部植體葉綠素總量均具有顯著正相關。據此，實際證明了能夠藉由葉綠素與氮素之關係推估稻株葉片之氮素狀態。

量測作物植體葉綠素的方法有許多種，其中利用葉綠素測計(chlorophyll meter)讀取測值，再經預建檢量線估算出葉綠素含量，是一種便捷而快速的量測方式(Peng *et al*., 1995, 1996; Piekielek and Fox, 1992; Piekielek *et al*, 1995; Schepers *et al*, 1992)。此一物理性方法操作簡易，關鍵點在於建立正確而完整的測計讀值與實測葉綠素值的檢量線，使其容納廣泛的讀值變異而適用於不同年份及期作。本研究即由水稻生育期間葉片之葉綠素與氮素含量的調查資料，配合相對應葉綠素測計的讀值，評估利用葉綠素計讀值估測不同期作葉綠素及氮素狀態的適用性。

二、方法簡述

本研究田間試驗期間包括 2000 年、2001 年之二期稻作及 2001 年、2002 年之一期稻作，計有二年四期作，參試水稻(*Oryza sativa* L.)品種爲臺農 67 號(TNG 67)，試區位於臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場，行株距 0.3 m×0.18m。田區土壤質地爲酸性壤土，酸鹼值 5.2，有機質 1.22%。藉由 0、30、60、90、120 及 150 kg N ha^{-1} 等六不同等級氮肥的施用，產生不同的稻株生長及植體葉綠素、氮素含量。氮肥用量均分三次施用，第一次以臺肥 39 號複合肥料 (N:P:K =12%:18%:12%，臺灣肥料公司，高雄市)爲基肥，於插秧後一週內施用；第二次以硫銨爲追肥，於插秧後 3 週(二期作)或 4 週(一期作)實施；第三次仍以硫銨爲穗肥，在抽穗前 1-2 週施用。另依照農委會出版之植護保護手冊推薦操作病蟲害的防治及雜草的防除，試求降低其等對氮肥處理之影響。

水稻生育期間定期(每隔 1-2 週)以葉綠素測計(chlorophyll meter, SPAD-502, Minolta Co. Ltd., Japan)量取稻株葉片讀值，每叢量測最上位完全展開葉片中間段上、下表面各一次，取平均值。每一次每處理小區調查 6 叢，以 6 叢均值爲代表值。完成測計讀值後，將稻株割取爲樣本，分別依照部位(葉片、莖稈、穗)歸類，以化學分析測定葉片之葉綠素總量及葉片氮素含量。由於試驗採用不同等級氮肥施用量，且包括兩年四期作資料，預料將可提高葉綠素總量及氮素含量差距，使得試驗結果容納廣泛的變異。簡言之，葉綠素測計的讀值可視爲葉片的綠度，或稱葉綠素的相對含量(Inada, 1963, 1985; Kariya *et al*., 1982)。本研究將測計讀值與葉片的化學分析實測值建立相關，以得到本試驗之迴歸方程式(又稱檢量線，calibration curve)。

葉綠素與氮素之化學分析方法修正自 Arnon (1949)，如李等(2002)及 Yang and Lee(2001)。取每處理小區 6 重覆樣本測值之均值爲該處理小區之代表值，比對葉綠素測計之讀值代表值，進行統計分析。本項試驗資料之統計分析，除了兩變數之相關分析之外，爲了合併一、二期稻作資料，以提高迴歸方程式之適用性，乃利用 SAS 8.2(SAS Institute, 2001)進行兩期稻作間的虛擬變數檢定(dummy variable test)，檢定結果不顯著以後再合併予迴歸分析。

三、結果與討論

本研究計調查與追蹤了兩年四期稻作生

育期間稻株葉片之葉綠素總量、氮素含量及葉綠素計讀值，發現在所有等級氮肥施用量下，稻株葉片之葉綠素總量、氮素含量或葉綠素測計讀值均隨著稻株生育而呈現下降趨勢(資料未列出)。顯然就單位重量而言，葉綠素及氮素含量在生育前期高於後期，而葉綠素計讀值則隨著此二項成分變化而異，這樣的趨勢在0-150 kg ha^{-1}的氮肥施用量範圍不受氮肥施用量的影響。

經由分析稻株葉片之氮素含量及葉綠素總量，發現一、二期稻作皆可以直線正相關($R_{1st\ crop}^2$=0.794, P<0.0001; $R_{2nd\ crop}^2$=0.400, P<0.0001)表示(圖 1)，即當氮素含量上升時，葉綠素總量隨著增加，兩期稻作資料合併分析結果亦顯示爲顯著直線正相關(R^2=0.615, P<0.0001)，惟未成 1:1 比例改變。因此，可利用此一迴歸方程式於一、二期稻作期間，相互推估葉綠素總量及氮素含量。

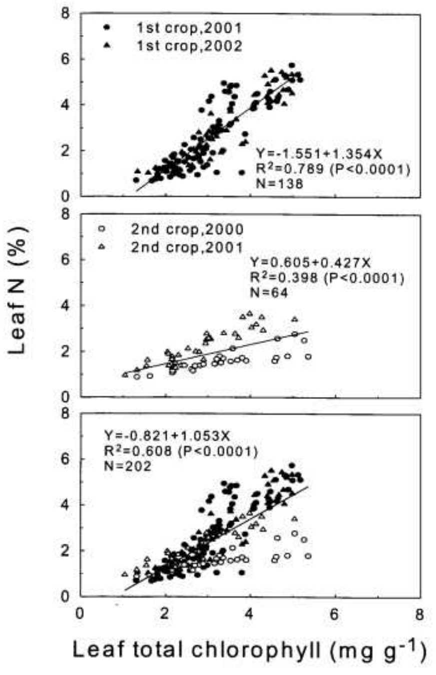


Figure 1. Relationships between leaf nitrogen content and leaf total chlorophyll for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown from the 2nd crop in 2000 till the 1st crop in 2002. (from 楊，2003)

試驗亦顯示，稻株葉片之葉綠素總量與葉綠素計讀值之關係可適用於直線相關，一、二期稻作之決定係數(R^2)分別爲 0.758(P<0.0001)及 0.862(P<0.0001)(圖 2)，兩期稻作合併資料的分析結果也爲顯著直線正相關(R^2=0.784, P<0.0001)。以此迴歸線當做檢量線，即可由葉綠素計讀值估測稻株葉片之葉綠素總量。

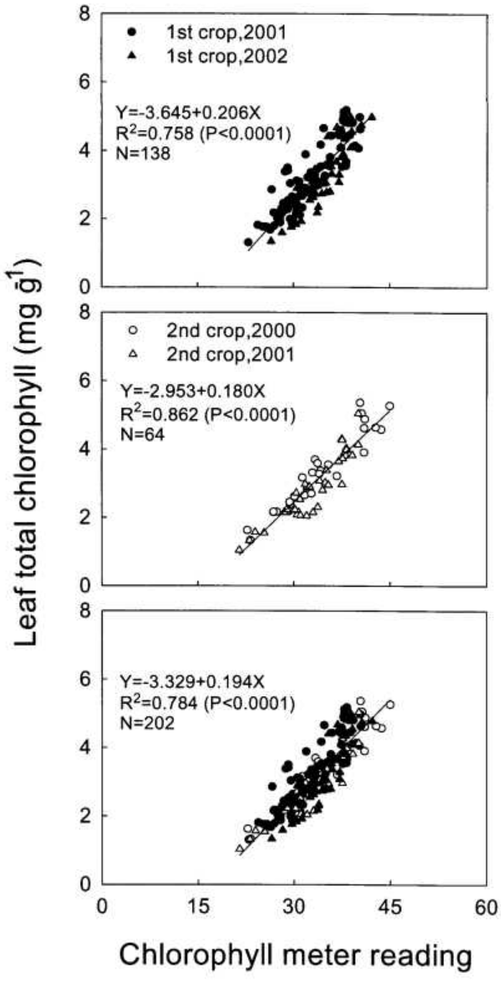


Figure 2. Relationships between leaf total chlorophyll and values of chlorophyll meter for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown from the 2nd crop in 2000 till the 1st crop in 2002. (from 楊，2003)

在獲得前述二項結果後，再將葉片氮素含量與葉綠素計讀值進行相關分析，其結果仍爲直線正相關(圖 3)，一、二期稻作之決定係數

分別爲 0.562 及 0.435，兩期稻作合併分析的直線相關也達顯著(R^2=0.399, P<0.0001)。據此，葉綠素測計讀值可利用此迴歸方程式推估稻株葉片之氮素含量。

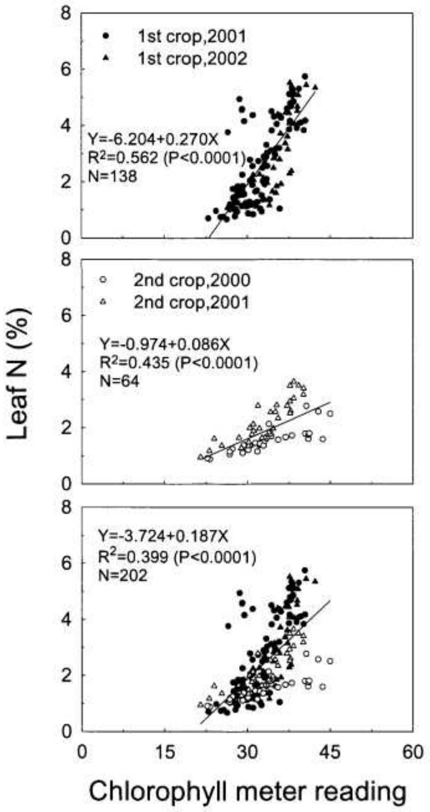


Figure 3. Relationships between leaf nitrogen content and values of chlorophyll meter for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown from the 2nd crop in 2000 till the 1st crop in 2002. (from 楊，2003)

四、結語

綜合本研究結果，稻株之單位重量葉片氮素含量與葉綠素總量具有顯著直線相關，且葉綠素計讀值與葉綠素總量也爲直線相關，使得葉片氮素含量與葉綠素計讀值之相關顯著。所以，在水稻的生育過程中即可以採用本研究獲得之迴歸模式(檢量線)，估測不同期作葉綠素及氮素狀態。若欲提高估測準確度，可再將之依不同生育階段進行分析，建立各特定生育階段適用的迴歸模式，預料當可以提高變數之間的相關性。如圖 4 所示。當只比較抽穗前的營養生長期資料，將提高葉綠素測計的估測準確度。值得注意的是，由於葉片厚度或葉片比重(specific leaf weight)因葉齡而異(Peng *et al.*, 1996)，本研究之葉綠素計讀值與葉片氮素(重量爲基礎)之關係可能會隨著生育期及品種(系)改變(Turner and Jund, 1994)。倘本研究所建立的關係在不同品種表現不一致時，則需要針對各品種建立特定的迴歸模式。而資料相容性高的品種，在考量廣適性的前提下，可以合併分析建立共用模式。

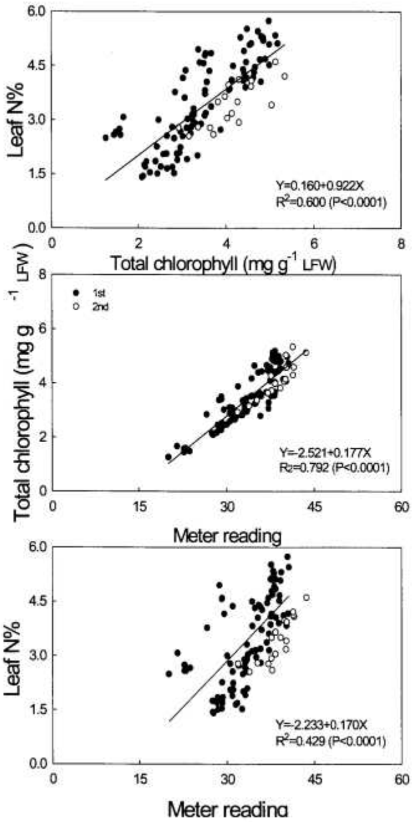


Figure 4. Relationships between leaf nitrogen content and leaf total chlorophyll, leaf total chlorophyll and values of chlorophyll meter, and leaf nitrogen content and values of chlorophyll meter for rice plants (*Oryza sativa* L. cv.

Tainung 67) grown in the vegetative phase in the 2nd crop of 2001 and the 1st crops of 2001 and 2002

又本研究再次證明葉綠素測計的使用方法確實簡便易行，可立即而快速的獲得非破壞性的測值，取得大量且準確的測點數據，係爲獲取田區大量非破壞性作物葉綠素狀態資料的理想工具。此一功能在氮肥管理上具有應用意義，通常農作物植體氮素含量介於 1-5%(重量百分比)，然隨著生育階段及生長情形而變動(Tisdale *et al*., 1993)。當植體氮素缺乏時，葉片顏色將轉成較淡的綠色或黃綠色，葉尖甚或開始枯黃。因此可藉由葉綠素濃度的改變造成的綠色程度變化，量測綠度(綠色強度，green color intensity)估出葉綠素，再換算出氮素狀態。惟在實務藉以從事氮肥管理之前，尚需釐清植體氮素含量與氮肥施用量之間的關係，此一關係或因不同生育而異，也受到土壤性質及氣象環境影響。

五、誌謝

本文研究承蒙行政院農委會農業試驗所試驗(91 農科-5.1.3-農-C2)及行政院國科會(NSC 91-2313-B-055-006)研究經費支持，特以致謝。

六、引用文獻

李裕娟、楊純明、張愛華。2002。施用氮肥對水稻植株氮素、葉綠素及植被反射光譜之影響。中華農業研究 51:1-14。

楊純明。2003。利用葉綠素計估測水稻植株葉綠素及氮素. 中華農業研究 52(2) (印出中) 。

Minolta Co. 1989. Chlorophyll meter SPAD-502 Instruction Manual. Minolta Co., Ltd., Japan.

Peng, S., R.C. Laza, F.V. Garcia and K.G. Cassman. 1995. Chlorophyll meter estimates leaf-based nitrogen concentration of rice. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 26:927-935.

Peng, S., F. V. Garcia, R. C. Laza, A. L. Sanico, R. M. Visperas and K. G. Cassman. 1996. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice. Field Crops Res. 47:243-252.

Piekielek, W.P. and R.H. Fox. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress N requirements for maize. Agron. J. 84:59-65.

Piekielek, W.P., R.H. Fox, J.D. Toth and K.E. Macneal. 1995. Use of chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. Agron. J. 87:403-408.

SAS Institute. 2001. SAS user's guide. V.8.2. SAS Inst., Cary, NC, USA.

Schepers, J.S., D.D. Francis, M. Vigil and F. E. Below. 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23(17-20):2173-2187.

Turner, F. T. and M. F. Jund. 1994. Assessing the nitrogen requirements of rice crops with a chlorophyll meter method. Aust. J. Exp. Agric. 34:1001-1005.

Yang, C.-M. and Y.-J. Lee. 2001. Seasonal changes of chlorophyll content in field-grown rice crop and their relationships with growth. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(B) 25:233-238.

Using Chlorophyll Meter to Estimate and Monitoring Leaf Chlorophyll and Nitrogen Status in Rice Plants[1]

Chwen-Ming Yang
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Field experiments were conducted at Taiwan Agricultural Research Institute Experimental Farm, Wufeng to investigate changes of leaf total chlorophyll and nitrogen content as well as values of chlorophyll meter for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. TNG 67) grown from the 2nd crop of 2000 to the 2nd crop of 2002. Results showed that leaf total chlorophyll and nitrogen content were decreased after transplanting in both cropping seasons, and values of chlorophyll meter followed the trend as these two components. Similar patterns were found between different amounts of nitrogen fertilizer treatments. Relationship between leaf total chlorophyll and nitrogen was significant linearly, in either crops as well as in pooled data from both crops. The values of chlorophyll meter and leaf total chlorophyll were linearly correlated in both the first and the second crops, and also in pooled data from both crops. Accordingly, relationship between leaf nitrogen content and chlorophyll meter readings was analyzed and was shown a significant linear relationship in both cropping seasons. The pooled data from two crops were also fitted to a linear regression model. Results suggest that leaf chlorophyll and nitrogen content can be estimated and monitored by chlorophyll meter in rice cultivar TNG 67.

Key words: Rice, Chlorophyll meter, Total chlorophyll, Nitrogen content.

機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用

申雍*[1]、李裕娟[2]、章國威[1]、姚銘輝[3]

[1]國立中興大學土壤環境科學系

[2]行政院業農委員會農業試驗所農藝組

[3]行政院業農委員農業試驗所農工組

E-mail:yshen@nchu.edu.tw

摘要 ---------- 98

一、前言 ---------- 98

二、機載簡易高光譜影像拍攝系統之建構 ---------- 99

三、機載簡易高光譜影像拍攝系統之應用 ---------- 101

四、結語 ---------- 102

五、誌謝 ---------- 102

六、引用文獻 ---------- 102

ABSTRACT ---------- 104

機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用

申雍*[1]、李裕娟[2]、章國威[1]、姚銘輝[3]
[1]國立中興大學土壤環境科學系
[2]行政院業農委員會農業試驗所農藝組
[3]行政院業農委員農業試驗所農工組
E-mail:yshen@nchu.edu.tw

摘要

高光譜影像可提供的作物訊息遠較多光譜影像豐富，適合用於判別作物所遭受的逆境種類與程度。目前國外已開發的高光譜影像拍攝系統多需裝設於飛機上，且還未引進國內，因此國內許多應該利用高光譜影像進行的精準農業研究工作乃遭遇瓶頸。本研究設法將自行開發之簡易高光譜影像拍攝系統裝設於直昇機上，以建立具有高機動性和高解析度的機載高光譜遙測系統，提供作爲精準農業相關研究的遙測工具。研究期間也曾進行多次空拍作業，配合已研發的多種遙測模式，提供田間有關水稻生育情形、氮營養狀況、以及預估產量之空間變異分佈圖。並以穗肥之精準施用爲例，說明機載簡易高光譜影像拍攝系統之應用模式。研究結果指出，利用機載簡易高光譜影像拍攝系統，可適時且快速獲得目標區內有關作物生長與生育情形的空間分佈資訊，遠較以人爲方式於地面進行採樣、分析的調查方式來得經濟有效，且具有整體的空間觀念，更有利於進行相關的研判工作。

關鍵詞：高光譜影像、遙感探測、空載、波段濾鏡、精準農業、氮肥。

一、前言

在水稻精準農耕的實務操作上，要求能及時提供田間水稻之生育、營養狀態、病蟲害、產量、土壤性質與肥力狀態、…等各種有關水稻生長及可影響水稻生長之環境因素的空間分佈資訊，以供做爲精準施肥、噴藥等田間管理措施之依據。應用遙測技術可以快速進行田間的調查作業，不僅可以達到及時提供所需資訊的要求，可節省所需的時間、經費、和人力。

國內自開始進行精準農業相關研究以來，在遙測技術之研發方面，除已建立水稻光譜資料庫，系統性的收集所累積的地眞反射光譜資料外(劉等，2002)，也已逐步利用地面反射光譜研發可鑑別水稻氮營養狀態(申等，2000；申等，2001；李等，2002)、病蟲害 (楊等，2002)、產量(申等，2002)、…等的遙測模式。由於這些模式通常需利用植被反射光譜中的細微變化進行鑑別的工作，以獲取必要的準確度，但是國內現有之資源衛星或航測飛機並無法提供所需之高光譜影像。國外雖已開發可裝設於飛機上的高光譜影像拍攝系統，但由於價格昂貴目前還未引進國內，因此國內許多應該利用高光譜影像進行的精準農業研究工作乃遭遇瓶頸。

申與李(2002)曾研發可架設於高空作業車上之簡易高光譜影像拍攝系統，並已獲得良好成果。因此，本研究乃嘗試將該簡易高光譜影像拍攝系統裝設於直昇機上，建立具有高機動性和高解析度的機載高光譜遙測系統，並適時進行多次空拍作業，獲取適當生育期之田間多光譜影像，提供多種有關田間水稻生育情形、氮營養狀況、以及預估產量之空間變異分佈圖，俾供「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」做出對應之網格決策圖，再交由「精準農業自動化農機操作系統」實施精準的施肥與噴藥操作，以協助國內精準農業之發展。

二、機載簡易高光譜影像拍攝系統之建構

簡易高光譜影像拍攝系統的硬體設備主要包含單色數位相機(EDC-1000L，Electrim)、光學鏡頭(PHF6 1.4，Canon)、窄波段濾鏡(Bandpass Filter ， Andover)及單板電腦(PCA6751，Advantech)。由於目前空拍作業以農試所精準試驗田區為主，因此整個系統以位於臺中之凌天航空公司的 Bell 206B3 型直昇機為觀測載台，其機型規格如表 1 所列，但未來也可依空拍作業地點，選擇其他航空公司的直昇機作為觀測載台。

本系統所用數位相機之 CCD 晶片(TC245)於波長範圍 400-900 nm 間具有>10%的光量子轉換效率，搭配適當的窄波段濾鏡後，即可用於獲取地表在可見光段和近紅外光段的多光譜影像。於此兩波段間，Andover 公司生產有近兩百種窄波段濾鏡，基本上各濾鏡之中心波長(CW/L)以 10 nm 為級距變化，濾波寬度(FWHM)則有 10、20、40、80 nm 等多種選擇，可依據需要選擇適當的濾鏡使用。目前本系統已配置的濾鏡種類及用途則簡述於表 2。為便利於直昇機上更換濾鏡，並避免起落架阻擋影像之拍攝，於機側加裝可將相機固定於起落架邊的延伸桿(相片 1)，此延伸桿也可輕易反轉，使相機位於操作者身旁以便更換濾鏡。

Table 1. Specification of the helicopter used as a platform carrying the simplified hyperspectral imaging system.

Model	Power	Max. Distnace	Pilots	Passengers	Expense
Bell 206B3	420SHP	375NM	2	3	$NT60000/hr

Table 2. Bandpass filters available to the simplified hyperspectral imaging system at present state and their intended usages.

CW/L (nm)	FWHM (nm)	Purposes
430	10	Chlorophyll a absorption peak
460	10	Chlorophyll b absorption peak
550	10	Phycoerythrobilin absorption peak, yield prediction
630	10	Chlorophyll b absorption peak
660	10	Chlorophyll a absorption peak, yield prediction
730	10	Nitrogen content determination
740	10	Nitrogen content determination
800	10	Plant vigorous, yield prediction
500	40	Simulate satellite Blue band
550	40	Simulate satellite Green band, yield prediction
650	40	Simulate satellite Red band, yield prediction
850	40	Simulate satellite NIR band, yield prediction

Photo 1. The extension rod extends the camera head of simplified hyperspectral imaging system to its lowest position. The rod also allows rapid filter change when airborne by turning it 180°

相機鏡頭光圈之變化範圍介於 F1.4 - F16 間，雖然相機可利用程式控制曝光時間介於 1msec - 3sec 間，但爲避免因直昇機震動造成影像模糊之問題，通常設定曝光時間小於 5msec，此時光圈位於 F8 附近。至於藍光與近紅外光區的低光量子轉換效率問題，可以經由增大鏡頭光圈的方式予以克服，實際拍攝經驗顯示並不會造成影像獲取上的困擾。

飛行高度則視擬涵蓋之影像範圍而定。由於飛行高度越高，越容易涵蓋擬拍攝之地區，但地面解析度則相對降低，也越容易受到空氣中水滴、空污等懸浮微粒之干擾，使得影像逐漸模糊。在本研究中，所設定的飛行高度爲 600m，可涵蓋約一平方公里的範圍，地面解析度約 70cm (圖 1)。爲進行大氣輻射校正，地面也同時舖設反射控制板(相片 2)，每塊控制板的尺寸爲 3m x 3m，分別以白色和黑色絨布製作，其反射光譜如圖 2 所示。白色控制板由於反射値高，因此最好舖設於擬拍攝區域之邊界，可同時作爲地面相對位置之指標使用。

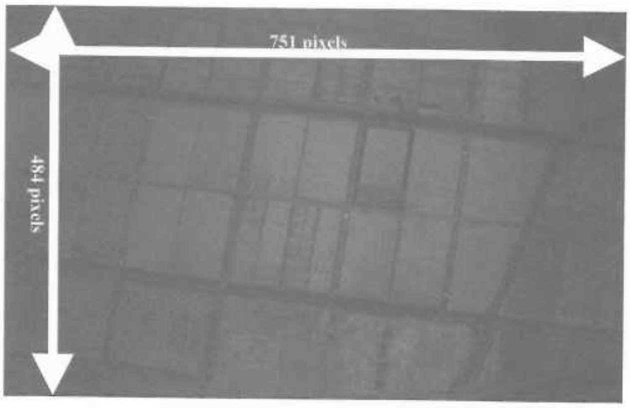


Fig 1. The 740nm image of rice fields for Rice Precision Cultivation Experiments taken by the simplified hyperspectral imaging system at 600m height.

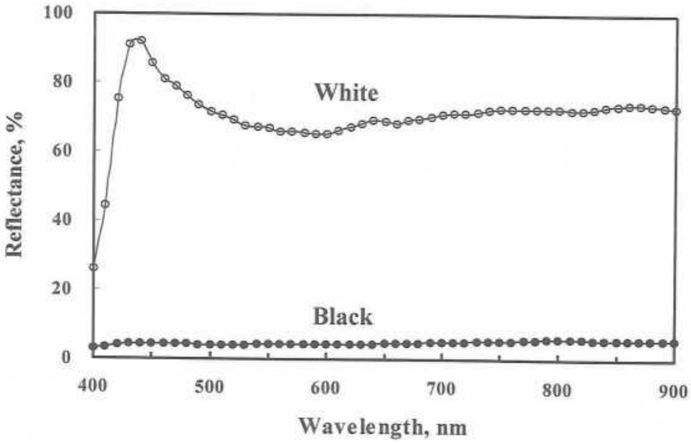


Fig 2. Reflectance spectrum of white and black cloths used as reflectance correction controls.

Photo 2. Placing white and black cloths in the field as control points for reflectance correction of the images taken by the simplified hyperspectral imaging system.

直昇機載台雖具有定點懸空的能力，但持續時間並不長，因此除應先向飛行員說明希望定點懸空的位置，還需提供飛行員由相機鏡頭所見的即時影像，屆時飛行員可依風向操控直昇機向定點位置慢慢逼近，當擬拍攝之區域位於影像中央時，即可錄下影像。更換濾鏡與調整光圈之時機則利用飛行員重新調整直昇機位置之空檔。實際拍攝經驗顯示，依以上程序操作，可得最好的拍攝效率與效果，在 30 分鐘內可拍得約 15 張的影像。

直昇機落地後，空拍影像可隨即利用自行撰寫的影像處理程式(EDCana ver.6)進行處理，該程式目前內含影像修正、幾何校正、輻射校正、重新取樣、植被指數計算、稻株氮營養計算、水稻產量計算等主要模組。實際操作經驗顯示，約在 1 小時內，即可完成所有影像處理程序，並產出可提供「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」與「精準農業自動化農機操作系統」後續應用所需之空間分佈圖及報表檔案(相片 3)。

Photo 3. Map of rice plant nitrogen content in the field in its text file format.

三、機載簡易高光譜影像拍攝系統之應用

利用機載簡易高光譜影像拍攝系統，配合已研發的各種遙測模式，可適時且快速獲得目標區內有關作物生長與生育情形的空間分佈資訊，遠較以人爲方式於地面進行採樣、分析的調查方式來得經濟有效，且具有整體的空間觀念，更有利於進行相關的研判工作。以下將以穗肥之精準施用爲例，說明機載簡易高光譜影像拍攝系統之應用，未來應可衍生出更多的應用方向。

就施肥的時效問題而言，圖 3 爲精準試驗田 74-89 等十個田區，在幼穗形成期間稻株內的氮營養狀況分佈圖，此圖係利用 730nm 和 740nm 兩張遙測影像，配合申等(2001)提出的稻株氮營養遙測模式所製作，空間解析度爲 2m x 2m。該圖之製作約在直昇機落地後 1 小時內可完成。若進行傳統的植體取樣與化學分析，若每區以 12.5m x 12.5m 的網格取樣，則將有 320 個樣品，需要一個全職分析人員至少一星期才能分析完畢，還不計採樣、清洗、烘乾與磨碎所需花費的時間。因此傳統的取樣與化學分析方式，並無法滿足稍縱即逝的施肥時機，但利用機載簡易高光譜影像拍攝系統卻可輕易達成此要求。

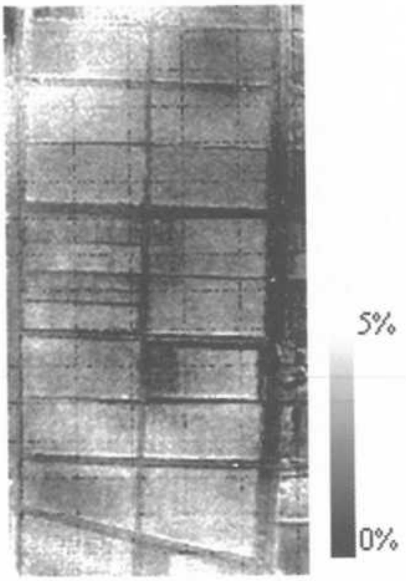


Fig 3. Map of rice canopy nitrogen content for field plots from no.74 to 89 at TARI on April 28, 2003.

就穗肥的用量而言，除依據稻株氮營養分佈圖作出穗肥精準施用決策圖外，還需利用由550nm、660nm、800nm 三張遙測影像，配合申等(2002)提出的水稻產量預估遙測模式所製作的預估產量分佈圖(圖 4)。以 75 號田爲例，75 號之西半邊，稻株體內氮含量平均小於 1.6%，但預估的產量卻可達 10ton ha^{-1} 以上，顯示稻株體內氮含量不足，因此穗肥施用量需較正常施用量爲高。反之，75 號之東半邊，稻株體內氮含量平均大於 2.5%，但預估的產量約僅有 7 ton ha^{-1} 左右，依據「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」之施肥標準，稻株體內氮含量已足夠，即使不施穗肥也可以。本年度 75 號田區係採行正常管理，即全區穗肥均依正常量施用，收穫時之產量調查顯示，75 號田區之東半邊的產量的確僅有 7 ton ha^{-1}，西半邊的產量略高可達 7.3 ton ha^{-1}。以上結果顯示，75 號田區若採行穗肥精準管理，將可節省東半邊的穗肥費用與人工，並於西半邊獲得較高之產量。

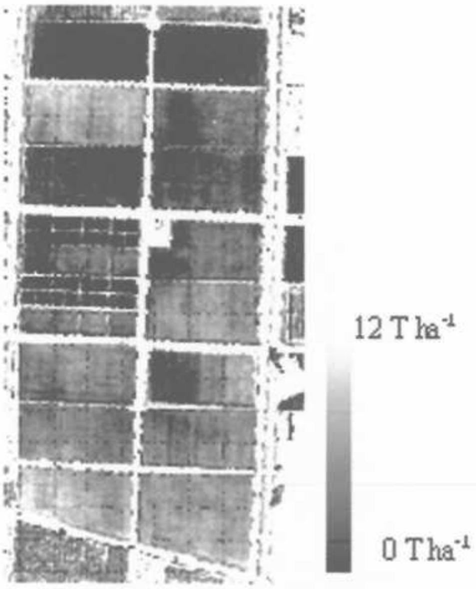


Fig 4. Map of predicted rice yields for field plots from no.74 to 89 of TARI on May 7, 2003.

就田間水稻的生育狀況而言，74、75、76、77、和 78 等區採行之栽培管理操作完全相同，但是稻株氮營養和預估產量兩張分佈圖卻顯示有明顯的空間變異，而造成此類空間變異的原因必然與土壤性質的空間變異有關。申等(2003)則利用機載簡易高光譜影像拍攝系統所獲得之遙測影像，協助確定田間影響水稻生育的潛藏土壤性質，使能經由土壤改良以提高水稻產量，這也是本研究所開發之簡易高光譜影像拍攝系統未來的應用方向之一。

四、結語

以上結果顯示，本研究所發展的機載簡易高光譜影像拍攝系統，結合同步發展的稻株氮營養遙測模式與產量預估遙測模式，不僅可以提供作爲田間精準施肥作業的依據，也可作爲進一步探討空間變異爲何產生以及如何控制空間變異的基礎。未來若能持續發展可判別田間水稻生育狀況的它種遙測模式，則只需更換適當的濾鏡，也可利用此套系統適時的獲知該種水稻生育狀況在田間的空間分佈情形。因此，本套系統對於我國精準農業之研究與發展將有莫大的助益。

五、誌謝

簡易多光譜影像拍攝系統相關研究，承蒙農業委員會農業試驗所編號 91 農科-5.1.3-農-C2(05)及 92 農科-1.1.6-農-C1(03)等計畫經費補助，以及農業試驗所農場組提供田間產量調查資料，得以順利完成，謹申謝忱。

六、引用文獻

申雍、羅正宗、鄭世朋。2000。稻株氮營養狀況遙測技術之建立。中華農業氣象 7:23-32。

申雍、李裕娟、章國威、羅正宗。2001。水稻

氮營養之遙感探測技術。p.235-238。有機肥料與合理化施肥研討會論文集。中華土壤肥料學會，臺中市。

申雍、章國威、李裕娟、楊純明、羅正宗。2002。應用遙測技術推估水稻產量之初探。p. 41-52。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

申雍、李裕娟。2002。簡易高光譜影像拍攝系統之研發與應用。p.129-138。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

申雍、陳仁炫、吳正宗、王鐘和、江志峰、劉禎祺。2003。應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術。p.81-88。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

李裕娟、張愛華、申雍、章國威、楊純明、羅正宗。2002。稻株氮營養狀態檢測技術。p.101-112。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

楊純明、鄭清煥、張義璋。2002。水稻遭受褐飛蝨及稻熱病感染之植被光譜特徵。p.1-18。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

劉建慧、楊聰仁、陳信吉、楊純明、申雍。2002。水稻光譜資料庫管理系統之建置。p. 91-100。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

Construction and Application of A Helicopter Mounted Simplified Hyperspectral Imaging System

Y. Shen*[1], Y.J. Lee[2], K.W. Chang[1] and M.H. Yao[3]
[1]Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan
[2]Division of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute (TARI), Taichung, Taiwan
[3]Division of Agricultural Engineering, TARI, Taichung, Taiwan
E-mail:yshen@nchu.edu.tw

ABSTRACT

Hyperspectral images can provide much more information about crops than multispectral images and are thus more suitable to identify the kind and extent of stress imposed on crops. However, hyperspectral imaging systems are mainly designed for airborne purposes and are not available in Taiwan. Therefore, many local precision agriculture research requiring hyperspectral images were hindered due to lack of hyperspectral imaging systems. The purpose of this study was to build a simplified hyperspectral imaging system which could be mounted on helicopters to acquire needed hyperspectral images for precision agriculture related studies. During the study, maps regarding field rice condition, nitrogen status, and predicted yield were obtained through selected air photo images and developed remote sensing models. The helicopter mounted simplified hyperspectral imaging system can acquire spatial information in target area much faster and more efficient than traditional survey method. Besides, it can provide a much integrate spatial picture and is useful in related analysis.

Key words: Hyperspectral image, Remote sensing, Air borne, Bandpass filter, Precision agriculture, Nitrogen fertilizer.

水稻精準農業體系
肥料深施及穗肥對水稻產量之效應及診斷研究
105-120, 2003

肥料深施及穗肥對水稻產量之效應及診斷研究

王鐘和*、林毓雯、丘麗蓉、陳琦玲、劉滄棽
行政院農業委員會農業試驗所農業化學組
E-mail: chwang@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 106

一、前言 ---------- 106

二、方法簡述 ---------- 108

三、結果與討論 ---------- 109

四、結語 ---------- 117

五、誌謝 ---------- 117

六、引用文獻 ---------- 117

ABSTRACT ---------- 120

肥料深施及穗肥對水稻產量之效應及診斷研究

王鐘和*、林毓雯、丘麗蓉、陳琦玲、劉滄棽
行政院農業委員會農業試驗所農業化學組
E-mail: chwang@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本研究探討肥料深施及穗(氮)肥施用對水稻生育的影響及穗(氮)肥施用必需性判定之基準。結果如次：深施區水稻之乾物產量、谷(穀)粒產量、全株氮素吸收量及谷粒氮素量均較傳統撒施區高。幼穗形成期增施穗(氮)肥 35 公斤/公頃明顯增加水稻生育中、後期之氮素吸收量、乾物產量、氮素收穫指數及收穫指數，故明顯提高谷粒產量。惟因深施區水稻氮素吸收效率較高，在較高氮肥用量區增加穗(氮)肥對全乾物產量及谷粒產量反而有不利影響。施穗(氮)肥可以提高氮肥之吸收率。水稻幼穗形成期全株氮含量達 1.86~1.95 % 時，施穗(氮)肥無增產效果，此與前人之結果相近。幼穗形成期葉片葉綠素計測值與全株氮含量呈極顯著正相關，可供此時期現場診斷植株氮營養推薦穗(氮)肥用量之依據。

關鍵詞：水稻、肥料深施、穗肥。

一、前言

氮素爲作物生長之必須要素，亦爲構成植物體中蛋白質與葉綠素之重要成分之一，與植體內之各項生理生化活動有密切之關係，尤其在光合作用及乾物質生產方面更受氮素營養之密切影響。

水稻栽培除了二氧化碳、氧氣、水及必需適時適量供應營養要素外，尙需足夠之矽，稻株才能正常生長，獲得理想之產量與品質(連，1996；連及王，1983)。水稻對三要素(氮、磷、鉀)之反應中，以對氮素的反應最爲敏感，氮素稍缺乏則發育不良，產量不高。惟如果施用過量或施用時期不當，亦易導致過度分蘗、孳生病蟲害或引起倒伏等負面效果而致減產。水稻自播種至收穫之任何階段均可吸收氮素，但就各階段所吸收氮素對稻穀生產之效率言，則以分蘗盛期及幼穗形成期爲最大。分蘗盛期及幼穗形成期氮素養分充足與否，影響穗數、稔實率及千粒重，因此欲獲高產，必需在這兩個時期充分供應氮素肥。氮肥施於稻田表面後，極易因脫氮作用而揮散損失，且亦有一部分流失，其損失量因土壤性質而異。因此，氮肥需分次施用，其中基肥需混入土中 0-12 公分才能減少損失，而漏水過速之水田則不施用基肥。分蘗盛期之追肥應視分蘗狀況，穗肥則依葉色，調節施用。磷肥以一次作基肥施用爲原則，鉀肥則著重追肥分施，避免過早施用而流失(連，1982；王，2002)。連等(1977)指出除了漏水嚴重之粗質地仍採用肥料分施法之外，對於中或細質地土壤，則可採用以需肥

量之 75%當基肥，且以耕耘機犁入土壤中，另 25%當穗肥的施肥法;既省工又可減少氮肥損失。

三要素中以氮肥對作物之增產效果最大，但過量之施用或施用不當所可能帶來之負效果亦最大，合宜的氮肥施用具有調節作物營養生長和生殖生長以達到最適收穫指數(HI，harvest index)之意義。早期一般農家慣於插秧後不久及稻作最高分櫱期施用追肥而不施基肥。民國 54~63 年(1965~1974)間各農業試驗改良場所在全省舉辦水稻氮肥分施試驗，結果証實，幼穗形成期之追肥(穗肥)可提高稻穀產量，並以基肥與分櫱盛期和幼穗形成期追肥之組合較佳(Su，1975)。本省過去已累積相關之試驗結果並釐訂有稻田之氮肥、磷肥及鉀肥之推薦用量，使水稻之施肥推薦邁向科學化(連，1996；Su，1975)。近年來在複作制度下，由於不同作物之施肥情況截然不同，前作施肥所殘留肥分和作物殘體對次作物之養分吸收將有莫大影響(Hayami，1975)。施用不同有機質肥料配合化學肥料對水稻生長及氮素之吸收與分佈之影響亦受關注(鍾等，1999)。

若能將 75%的需肥量於插秧時或插秧後不久，以施肥機點施於稻株間約 7~10 公分深處，則肥效更加顯著;高雄區農業改良場即研製「高改式水稻深層施肥機」於插秧後 7~10 天以人工操作將氮肥用量之 75%行深層點施，另 25%當穗肥，結果較標準分施方法可節省 15~30%氮肥而仍可維持相同的高產量(鄒及林，1980a)。此種結果曾於 61~64 年(1972~1975)間在全省各地示範而獲得良好結果(鄒及林，1980b)。超大顆粒尿素(USG)深施提高氮素回收率及稻谷產量之效果，以一期稻優於二期稻，一期稻谷產量可達 13%，氮回收率最高可達 77%；二期稻谷產量最高只有 3%(屏東新埤)，而氮回收率最高亦只有 41%(莊，1993)

不同生育階段之水稻除自土壤吸收由有機物礦化釋放之氮素外，需由施肥供應吸收，達到各時期之最適氮素含有量，此種理論亦可適用於小麥(深山，1990)。水稻產量構成要素為每株穗數、稔實穗粒數及千粒重，單位面積稔實穗粒數與抽穗期間氮素的吸收有顯著相關性(Genshichi and Cruz，1990)。水稻植體中氮素之累積與分佈過程對穀粒產量具有決定性之影響(Norman *et al*.,1992)。為使水稻能夠產生足夠之穗數與粒數，可於初期將尿素包於泥土或衛生紙之中等候深施，並於幼穗形成期配合施撒一次穗肥。此外必須發展出較為簡便之深施技術，上述之深施方法之原理才能實際的被利用(謝及黃，1976)

葉片是水稻植株中氮素之主要積儲器官(sink)(戴，1990)，含氮量佔全株之 39-48%，為含氮量最高之組織(Dingkuhn *et al*.,1992)。在分櫱盛期之後，氮素含量逐漸降低(Tripathy and Upadhyay,1989)。通常營養器官氮素之轉移發生在抽穗左右，二期作較早，一期作較遲(戴，1990)。葉片、莖桿、葉鞘三者減少之總和與穗部獲得之再轉移性氮素之總量大約相等(Mae and Ohira, 1981)。許多研究顯示，增加葉部氮素含量，光合作用率也隨之增加(Yoshida and Coronel,1976)。高產品種的水稻，葉部含氮量較高(Dingkuhn *et al*., 1992b)，葉綠素含量也較高(Chau and Deshmukh, 1991)。應用攜帶型葉綠素計測定葉片之測值與葉片之葉綠素含量、氮素含量、全株氮素含量均呈顯著正相關(王及王，1996；王等，2002)。

水稻屬 C3 型作物，氮素利用效率較 C4 型作物玉米低(Ku *et al*., 1979)。Yoshida(1981)指出氮肥對子實生產之效率 FE(efficiency of fertilizer-N = kg yield/kg N applied)等於施用氮肥之吸收效率 abs. % (efficiency of absorption = kg N absorbed / kg N applied)乘以

被吸收氮素產生子實之效率 NE (absorbed-N to produce yield = kg yield/kg N absorbed)。Tanaka *et al.*(1984)亦指出產量等於植體吸收氮素總量(N/plant)乘以吸收氮素之谷生產效率 NE(efficiency of N accumulation in plants to produce yield)。

鑑於未來科學化精準肥培管理之需要，本研究調查及分析不同肥料施用方式(傳統撒施及深施)及穗(氮)肥施用與否之處理下，水稻各生育期之葉片葉綠素計測值、葉面積指數、植體各器官乾物及氮素含量，收穫期之植體各器官乾物及氮素分布情形、以及穗數、千粒重及穗粒數等收量構成因子，並比較不同處理之氮素效率，探討肥料深施及穗肥對水稻產量之效應，以及穗肥施用之診斷技術。

二、方法簡述

(一)供試地點：農試所農場之試驗田區之 38、39、42 及 43 號田(表土土壤性質如表 1)。

(二)供試作物：水稻(*Oryza sativa* L.)台農 67 號。

(三)肥培管理處理：

1.氮肥等級：氮肥用量(不含穗(氮)肥量)分爲 0、45、90 及 135 公斤/公頃四級，各氮肥等級區一半之試區於幼穗形成期追(撒)施穗(氮)肥 35 公斤/公頃。

2.施肥方式：分(1)傳統撒施(38 及 42 號田區)及(2)深施(39 及 43 號田區)兩種。(傳統撒施區之氮肥以硫酸銨施用，深施區則以台肥復合肥料 5 號施用)。

3.磷鉀肥施用量：分別爲磷酐(P_2O_5)70 公斤/公頃及氧化鉀(K_2O)70 公斤/公頃。以過磷酸鈣及氯化鉀肥料施用。

4.施用時期：(1)傳統撒施區分三次(依作物施肥手冊推薦之比例：基肥、第一次追肥(分蘗始期)及第二追肥(分蘗盛期)之用量比例爲 5/15：4/15：6/15)施用(表 2 及表 3)。

Table 1. Soil properties and fertility status of the surface soils in the experimental fields(2002).

Field No.	pH	OM %	CEC cmol(+)kg^{-1} soils	Ca	Mg	K	Na	P	K	Zn
				NH$_4$OAC extractable (cmol(+)kg^{-1} soils)				Mehlich's 3 extractable (ppm)		
38	5.31	2.13	7.8	4.56	1.35	0.11	0.1	16.5	33.8	3.97
39	4.32	2.22	7.53	4.21	1.28	0.2	0.17	31	74.3	5.29
42	4.95	2.21	7.82	3.76	1.11	0.1	0.08	19.2	36.1	4.76
43	5.01	2.18	8.13	3.94	1.31	0.16	0.08	21.4	42.9	4.52

Table 2. Fertilization methods for the experiment conducted in the first cropping season of 2003. (surface application).

Treatment	Before transplanting kg/ha	Initial tillering stage kg/ha	Active tillering stage kg/ha	Panicle initiation stage kg/ha
N0	0	0	0	0
N0+35	0	0	0	35
N45	15	12	18	0
N45+35	15	12	18	35
N90	30	24	36	0
N90+35	30	24	36	35
N135	45	36	54	0
N135+35	45	36	54	35
P_20_5	70	0	0	0
K_20	17.5	17.5	21	14.0

Table 3. Fertilization methods for the experiment conducted in the first cropping season of 2003. (deep application).

Treatment	Before transplanting kg/ha	Initial tillering stage Kg/ha	Active tillering stage kg/ha	Panicle initiation stage kg/ha
N0	0	0	0	0
N0+35	0	0	0	35
N40	40	0	0	0
N40+35	40	0	0	35
N77	77	0	0	0
N77+35	77	0	0	35
N112	112	0	0	0
N112+35	112	0	0	35
P_20_5	70	0	0	0
K_20	70	0	0	0

(2)深施區於水稻插秧時以深層施肥插秧機同步一次深施，深度約 3~5 公分。

5.試驗設計：撒施區及深施區各八處理，二重複，小區面積 25×25m。

(四)調查及分析項目:

1.調查分蘗盛期、幼穗形成期、抽穗期之葉面積指數、葉綠素計值、植體各器官乾物重及氮素分布情形。

2.收穫期之植體各器官乾物重及氮素分布情形、每叢株數、每叢穗數、千粒重、穗粒數及其他農藝性狀。

3.計算項目：

(1) 氮肥吸收效率 F-N abs. % (fertilizer-N absorption efficiency) = kg N absorbed / kg N applied

(2) 氮素生產效率 NE(absorbed –N to produce yield = kg yield/kg N absorbed)

三、結果與討論

對乾物質累積與分配之影響

作物產量的基礎是以乾物質生產和分配爲主，提高作物的產量也就是如何提高作物乾物質的生產和分配(Wallace and Zobel，1982)。氮素肥料對水稻之重要性無庸置疑，適當合宜的施用氮肥對稻谷有明顯的增產效果，但不當過量的施用也會造成反效果(連，1982；王等，2002)。圖 1 爲氮素用量與稻谷產量之相關圖，顯示隨著氮素用量增加，稻谷之產量增加，相同氮素用量下深施區之產量高於撒施區。而在幼穗形成期增施 35 公斤/公頃氮肥之效應，則顯示在較低氮肥用量處理明顯有增產效果，氮素用量提高時增產的效果減少，在深施區之較高氮素用量處理區(N 112 公斤/公頃)甚至導致產量下降，此情形可能與氮素供應過量有關。石塚及金雄(1967)亦指出玉米生育過程中雌穗抽絲期以後的子實成熟期間，稈葉的乾物重仍有增加，即仍有營養生長進行，故過多的氮素營養對子實的充實不利。

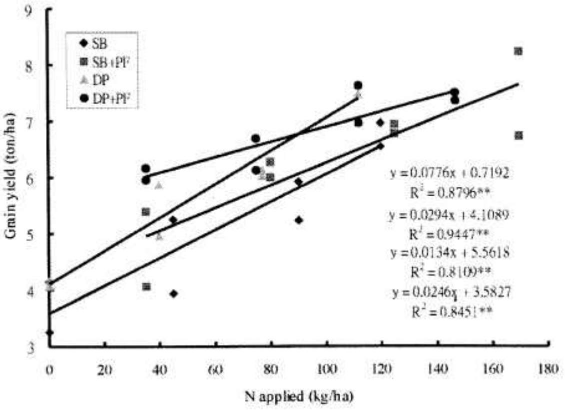


Fig.1.Relationship between nitrogen applied rate and grain yield of rice grown in the first cropping season of 2003.(SB：surface broadcast；SB+PE：surface broadcast + panicle fertilizer；DP：deep placement；DP+PF：deep placement + panicle fertilizer)

表 4 中顯示傳統撒施區幼穗形成期增施穗(氮)肥，在各級氮肥處理區除了最高氮肥用量區(N 135 公斤/公頃)，因而導致全乾物量略下降外，其餘對水稻植株之全乾物量及稻谷產量均有明顯增加之效果。表中也顯示增施穗肥顯著提高收穫指數(HI)，亦即施穗肥可明顯提高乾物質分配至稻谷的比率。氮肥深施區增施穗肥也是在最高氮肥用量區(112 公斤/公頃)，導致全乾物量及稻谷產量略爲下降，而收穫指數未改變，其餘氮肥用量處理區則均顯著提高植株全乾物量、稻谷產量及收穫指數(表 5)。此結果與前人報告施穗(氮)肥可提高稻谷產量之結果符合(鄭，1975；鄭，1982；連，1972；謝及黃，1976)。

Table 4. Effects of different fertilizations on total dry matter, grain yield and harvest index of rice grown in the first cropping season of 2003. (surface application)

Treatment	Total dry matter ton/ha	Grain yield ton/ha	HI
N0	6.88(1.25)*	3.70(0.51)	0.49(0.01)
N0+35	8.82(0.51)	4.73(0.77)	0.50(0.02)
N45	8.36(1.04)	4.60(0.67)	0.47(0.01)
N45+35	9.79(0.12)	6.14(0.36)	0.52(0.00)
N90	9.79(0.89)	5.56(0.42)	0.49(0.01)
N90+35	11.36(0.01)	6.86(0.13)	0.53(0.00)
N135	12.52(0.03)	6.74(0.27)	0.47(0.02)
N135+35	12.04(1.49)	7.48(0.83)	0.54(0.01)

*Means of 2 replications with(SD)

Table 5. Effects of different fertilizations on total dry matter, grain yield and harvest index of rice grown in the first cropping season of 2003. (deep application).

Treatment	Total dry matter ton/ha	Grain yield ton/ha	HI
N0	7.80(0.41)*	4.12(0.21)	0.48(0.01)
N0+35	10.57(0.99)	6.06(0.58)	0.52(0.00)
N40	9.71(0.09)	5.41(0.50)	0.49(0.01)
N40+35	10.63(0.78)	6.40(0.36)	0.53(0.00)
N77	10.97(0.00)	6.08(0.36)	0.47(0.02)
N77+35	12.49(1.55)	7.29(0.44)	0.50(0.03)
N112	14.75(1.19)	7.55(0.53)	0.47(0.02)
N112+35	13.17(0.03)	7.42(0.50)	0.47(0.01)

*Means of 2 replications with(SD)

表6及表7各生育階段乾物累積量之比較顯示在分蘗盛期不同氮肥用量區水稻之全乾物量差異不大，分蘗盛期至幼穗形成期之期間乾物之累積量則明顯隨著氮肥用量增加而增加。此結果乃水稻在分蘗盛期前植株之生長量及根系量均較小，對氮素的需求也較小，故對各氮肥等級處理之反應較小。過了分蘗盛期植株快速分蘗對養分的需求明顯提昇，較高氮肥區植株的生長明顯被促進，故乾物明顯增加。另外，兩表中均顯示施穗肥顯著提高幼穗形成期至抽穗期之乾物累積量，對抽穗期至收穫期間之乾物增加也有提高的效果。比較表中不含N 0 公斤/公頃區之資料，顯示幼穗形成期之前氮肥撒施區與深施區水稻全乾物量相近(撒施區 3.01~4.18 公噸/公頃，深施區 2.95~4.19 公噸/公頃)，而幼穗形成期至收穫期之期間，深

施區乾物增加量明顯較撒施區高(撒施區 7.18~8.20 公噸/公頃，深施區 8.48~13.31 公噸/公頃)。顯示深施區水稻生育中期以後植株有較佳的乾物生產之能力。王(1993)指出播植行深犁肥料深施可促進玉米吐絲期以後之氮磷鉀要素吸收量及乾物生產，提高子實產量。Calvert and Pesek(1964)指出肥料深施可促使玉米生育期吸收較多之營養元素。Gass *et al.*(1971)及 Chabalier and Pichot(1979)則表示玉米生育後期所吸收之氮素直接運移於子實而不浪費於營養生長。

Table 6. Effects of different fertilizations on total dry matter in different growth durations for rice grown in the first cropping season of 2003. (surface application).

Treatment	Transplanting ~ Active tillering stage ton/ha	Active tillering ~ Panicle initiation stage ton/ha	Panicle initiation ~ Heading stage ton/ha	Heading ~ Maturity ton/ha
N0	0.23(0.04)[x]	1.60(0.32)[x]	3.36(0.50)[y]	3.17(0.28)[y]
N0+35			3.83(0.40)	3.69(0.25)
N45	0.33(0.03)	2.68(0.38)	2.92(0.44)	4.26(0.50)
N45+35			3.25(0.02)	4.95(0.08)
N90	0.39(0.05)	2.70(0.42)	3.38(0.44)	5.29(0.17)
N90+35			4.50(0.16)	5.70(0.39)
N135	0.46(0.06)	3.72(0.50)	3.50(0.89)	5.52(1.21)
N135+35			4.49(1.43)	4.62(0.83)

[x] Means of 4 replications with(SD)
[y] Means of 2 replications with(SD)

Table 7. Effect of different fertilization on total dry matter in different growth durations for rice grow n in the first cropping season of 2003. (deep application).

Treatment	Transplanting ~ Active tillering stage ton/ha	Active tillering ~ Panicle initiation stage ton/ha	Panicle initiation ~ Heading stage ton/ha	Heading ~ Maturity ton/ha
N0	0.26(0.05)[x]	1.91(0.17)[x]	3.19(0.31)[y]	3.52(1.66)[y]
N0+35			3.45(0.24)	4.75(0.71)
N40	0.26(0.05)	2.69(0.61)	4.40(0.55)	6.36(0.47)
N40+35			5.50(1.68)	5.30(1.57)
N77	0.33(0.08)	3.30(0.68)	4.62(0.73)	3.86(1.51)
N77+35			6.25(0.55)	3.95(0.81)
N112	0.38(0.03)	3.81(0.28)	6.42(0.46)	4.51(1.32)
N112+35			6.68(0.06)	6.63(0.09)

[x] Means of 4 replications with(SD)
[y] Means of 2 replications with(SD)

表 8 及表 9 顯示隨著氮肥用量增加，植株之株高、每叢分櫱數及每叢穗數增加，氮肥深施區水稻之株高明顯高於撒施區，增施穗肥對每叢株數及穗數無明顯影響。增施穗肥對撒施區及深施區水稻之每穗粒數均有增加之效果，對撒施區之千粒重也有提高之效果，深施區則無。謝及黃(1976)亦指出為使水稻能產生足夠之穗數與粒重，可採行肥料深施並於幼穗形成期施穗肥。

Table 8. Effects of different fertilizations on plant height, tiller number, panicle number, grain number per panicle and 1000-grain weight of rice grown in the first cropping season of 2003. (surface application).

Treatment	Plant height (cm)	Tiller no. per hill	Panicle no. per hill	Grain no. per panicle	1000-grain weight (g)
N0	92.8(0.2)[x]	12.7(1.3)	12.7(1.3)	85.3(13.4)	24.5(0.3)
N0+35	95.2(1.5)	13.7(1.0)	13.7(1.0)	88.1(3.1)	25.0(1.4)
N45	94.2(2.8)	16.0(0.7)	16.2(0.5)	78.6(0.4)	24.8(1.0)
N45+35	96.3(1.7)	15.8(0.5)	15.7(0.3)	89.9(4.6)	25.6(1.2)
N90	99.0(0.7)	19.5(0.2)	19.5(0.5)	77.6(4.3)	24.6(0.5)
N90+35	102.3(3.0)	18.0(0.3)	17.5(0.8)	95.7(0.5)	26.0(0.9)
N135	101.5(3.2)	20.3(3.0)	20.0(2.7)	81.1(1.1)	24.0(1.0)
N135+35	98.0(0.7)	20.0(0.0)	19.8(0.2)	96.8(1.7)	24.5(0.5)

[x]Means of 2 replications with(SD)

Table 9. Effects of different fertilizations on plant height, tiller number, panicle number, grain number per panicle and 1000-grain weight of rice grown in the first cropping season of 2003. (deep application).

Treatment	Plant height (cm)	Tiller no. per hill	Panicle no. per hill	Grain no. per panicle	1000-grain weight (g)
N0	89.2(3.5)[x]	12.5(1.5)	12.2(1.8)	78.2(3.8)	25.3(0.7)
N0+35	98.8(3.2)	12.5(0.5)	12.2(0.2)	111.3(14.0)	23.6(1.3)
N40	99.7(1.0)	17.7(0.9)	17.4(0.6)	89.4(3.2)	24.7(0.8)
N40+35	102.0(3.7)	17.5(1.8)	17.3(2.7)	107.2(20.2)	23.7(0.9)
N77	104.0(7.7)	15.8(0.5)	15.5(0.8)	91.8(8.7)	23.2(0.4)
N77+35	108.2(2.5)	16.7(0.3)	16.5(0.5)	102.7(1.2)	23.5(1.7)
N112	111.0(1.3)	19.2(0.5)	19.0(0.3)	101.6(2.9)	21.4(1.8)
N112+35	118.8(1.2)	20.5(0.8)	19.5(1.2)	111.2(7.7)	21.8(0.3)

[x]Means of 2 replications with(SD)

對氮素吸收及分配之影響

表 10 及表 11 顯示隨著氮素用量增加，植株氮素吸收量增加，增施穗肥區不但明顯增加水稻氮素吸收量，也明顯提高氮素分配至谷粒之比率；即提高氮素收穫指數(NHI)，當然就提高了谷粒氮素量。洪及劉(1979)指出水稻幼穗形成期施用氮肥的利用率最高，可達 60~69 %，對谷粒的增產效果較其他時期大。莊(1993)之研究顯示，大顆粒尿素深施可明顯提昇氮素肥料的回收率減少流失。王(1993)之報告亦指出於玉米雄穗抽出期增施穗(氮)肥，對氮素吸收量及氮素收穫指數均有明顯的提昇效果。

Table 10. Effects of different fertilizations on total nitrogen absorbed, grain nitrogen and nitrogen harvest index of rice grown in the first cropping season of 2003. (surface application).

Treatment	Total nitrogen absorbed kg/ha	Grain nitrogen Kg/ha	NHI
N0	71.1(1.7)[x]	43.1(1.8)	0.61(0.01)
N0+35	81.3(0.6)	52.5(2.8)	0.65(0.03)
N45	89.2(6.9)	53.3(3.0)	0.60(0.01)
N45+35	103.4(0.9)	67.9(4.8)	0.66(0.04)
N90	105.6(2.8)	65.8(2.5)	0.62(0.01)
N90+35	119.5(5.7)	79.6(4.6)	0.67(0.01)
N135	112.9(8.0)	67.5(7.5)	0.60(0.02)
N135+35	130.9(3.8)	87.8(3.0)	0.67(0.0)

[x]Means of 2 replications with(SD)

Table 11. Effects of different fertilizations on total nitrogen absorbed, grain nitrogen and nitrogen harvest index of rice grown in the first cropping season of 2003. (deep application).

Treatment	Total nitrogen absorbed kg/ha	Grain nitrogen Kg/ha	NHI
N0	73.1(19.2)[x]	50.4(6.5)	0.72(0.10)
N0+35	92.7(21.2)	64.0(5.6)	0.71(0.1)
N40	102.8(18.6)	69.5(3.7)	0.69(0.09)
N40+35	132.3(20.5)	98.1(4.0)	0.75(0.09)
N77	103.2(30.0)	69.9(14.4)	0.70(0.06)
N77+35	129.9(19.3)	90.2(1.5)	0.71(0.12)
N112	120.3(23.7)	79.0(8.2)	0.67(0.06)
N112+35	169.7(27.0)	111.6(2.7)	0.67(0.09)

[x]Means of 2 replications with(SD)

表 12 及表 13 進一步顯示，雖然在分蘗盛期時撒施區及深施區水稻之氮素吸收量相近，但是在分蘗盛期至幼穗形成期之期間，深施區水稻之氮素吸收量則均顯著高於撒施區，甚至有高達 2 倍者。顯示深施區此期間土壤氮素供應應十分充足，加上水稻根系於此時已生長有相當規模，故能吸收較多量的氮素。另外增施穗肥明顯增加幼穗形成期至抽穗期之期間水稻的氮素吸收量，施穗肥對抽穗期至收穫期間之氮素吸收則無明顯影響。由上述資料顯示，深施區氮素的流失率應較傳統撒施區明顯較少，所以其施用量雖較少，但卻能使水稻由分蘗盛期至抽穗期的生長期間，均能吸收較多量的氮素肥料，而前人報告也指出氮素肥料深施的流失量較少，回收率較高(莊，1993；謝及黃，1976；鄭等，1982；王，1983)。

Table 12. Effects of different fertilizations on nitrogen absorbed in different growth durations for rice grown in the first cropping season of 2003.(surface application).

Treatment	Transplanting ~ Active tillering stage kg/ha	Active tillering ~ Panicle initiation stage kg/ha	Panicle initiation ~ Heading stage kg/ha	Heading ~ Maturity kg/ha
N0	6.8(1.2)[x]	15.1(1.6)[x]	11.7(0.7)[y]	36.4(0.9)[y]
N0+35			31.3(1.7)	29.2(1.5)
N45	10.7(1.0)	21.3(3.1)	4.6(2.6)	48.7(5.9)
N45+35			17.3(2.4)	57.9(4.7)
N90	14.4(1.7)	22.8(4.7)	2.6(2.1)	59.7(6.4)
N90+35			27.2(4.6)	51.1(1.4)
N135	17.6(3.9)	35.7(4.6)	1.7(4.9)	59.7(6.9)
N135+35			34.0(14.7)	41.8(17.4)

[x]Means of 4 replications with(SD)　[y]Means of 2 replications with(SD)

Table 13. Effect of different fertilization on nitrogen absorbed of rice in different growth duration (2003 first crop，deep application).

Treatment	Transplanting ~ Active tillering stage kg/ha	Active tillering ~ Panicle initiation stage kg/ha	Panicle initiation ~ Heading stage kg/ha	Heading ~ Maturity kg/ha
N0	8.6(1.6)[x]	19.0(1.1)[x]	14.2(0.9)[y]	31.7(18.9)[y]
N0+35			17.9(0.4)	46.9(21.4)
N40	9.0(1.5)	32.5(6.6)	10.4(9.3)	49.5(20.3)
N40+35			36.5(15.6)	55.6(3.3)
N77	11.5(2.7)	46.1(14.3)	5.1(1.4)	41.9(36.8)
N77+35			35.8(11.4)	35.2(14.6)
N112	15.6(1.6)	65.9(16.0)	5.8(5.4)	25.5(35.7)
N112+35			18.6(9.7)	77.1(24.5)

[x]Means of 4 replications with(SD)
[y]Means of 2 replications with(SD)

Shoji *et al.*(1974)報告一般水稻吸收氮素之終了期約在最高分蘗期，因此除非再供給大量氮素，否則水稻體內氮素的增加，將受到相當的限制。而本試驗台農 67 號水稻在幼穗形成期以後仍有多量之氮素吸收，此應與其爲高產量品種有關。且種植時肥料深施及幼穗形成期增施穗(氮)肥則可以再進一步增加生育中期的氮素吸收。

氮素效率之比較

圖 2 顯示不施穗(氮)肥處理區之氮肥吸收效率以深施區較傳統撒施區高，惟隨著氮肥用量增加其差異縮小。施穗(氮)肥可提高氮肥吸收效率，深施區亦明顯較撒施區高。氮肥效率受品種及栽培方式的影響，莊(1993)指出較大顆粒尿素深施可顯著提昇肥料的回收率。謝及黃(1976)也指出氮肥深施及施用穗(氮)肥，可提升水稻的產量及氮吸收量。玉米種植時採行肥料深施及施穗(氮)肥也有相同的情形(王，1993)。

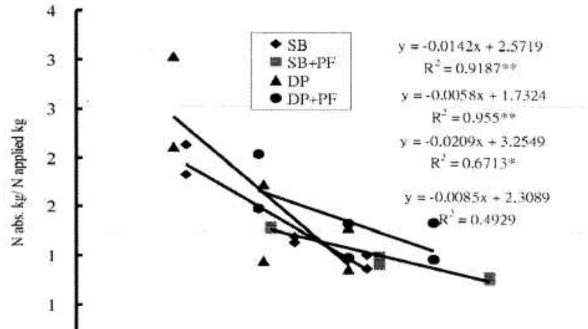


Fig.2. Relationship between nitrogen applied rate and fertilizer-N absorption efficiency under different fertilization methods for rice grown in the first cropping season of 2003.(SB：surface broadcast；SB+PE：surface broadcast + panicle fertilizer；DP：deep placement；DP+PF：deep placement + panicle fertilizer)

圖 3 則顯示氮素生產效率(NE)隨著氮素吸收量增加而降低，此與前人報告相符(Yoshida，1981；Tanaka *et al.,* 1984)，深施區水稻有較高氮素吸收量時，施穗(氮)肥區之氮素生產效率(每公斤氮素生產稻谷之效率)較無穗(氮)肥區高。撒施處理區施穗(氮)肥處理之 NE 雖也較高，但未有顯著差異。而玉米於雄穗抽初期施穗(氮)肥亦有提高氮素生產效率的效果(王，1993)。

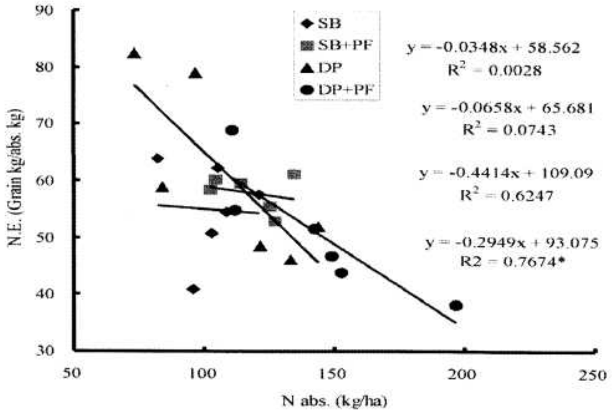


Fig.3. Relationship between nitrogen absorbed and nitrogen efficiency under different fertilization methods for rice grown in the first cropping season of 2003. (SB：surface broadcast；SB+PE：surface broadcast + panicle fertilizer；DP：deep placement；DP+PF：deep placement + panicle fertilizer)

幼穗形成期氮營養診斷技術

水稻自播種至收穫之任何生育時間均可吸收氮素，但就各生育期所吸收之氮素對稻谷之生產效率言，則以有效分蘗期及幼穗形成期所吸收者較大。故爲使稻谷增產，有效分蘗期之施肥(包括基肥)和穗肥(幼穗長達 1~2mm 時)之適當施用，甚爲重要。實際上二者配合之施肥方式已廣爲農家採用。惟穗肥之效果每與分蘗期施肥(包括基肥)之用量有關；如幼穗形成期以前，水稻已經吸收足量氮肥，則穗肥之效果往往不顯著，甚而導致減產。在此種情形下，穗肥之施用期應移後或其用量應減少。故爲期肥料之有效施用，穗肥施用前之植株氮營養診斷最爲重要。前人研究已指出幼穗形成期時全株氮素含量達 2.0％以上

時，施穗肥無增產效果(連，1972)。此結果並已作爲水稻氮肥施用之準則(作物施肥手冊，1996)。惟此法需採取全株進行化學分析，不但植株樣本龐大，且處理甚費時。

以葉綠素計測定葉片之測值與葉片氮素含量、葉綠素含量及全株氮含量均有顯著正相關(王及王，1996；王等，2001；王等 2002)。故可應用於診斷植株之氮素營養狀態。本試驗測定並比較幼穗形成期水稻之全株氮含量，葉片氮含量及葉片葉綠素計測值之相關，結果顯示：水稻幼穗形成期葉片葉綠素計測值與葉片氮素含量及全株氮素含量均呈極顯著正相關，葉綠素計測值相同時，深施區之葉片氮素含量較撒施區高(圖 4 及圖 5)，而葉片氮素含量與全株氮素含量之間也呈極顯著正相關，深施區與傳統撒施區並無明顯差異(圖 6)。與去年之資料比較可知，全株氮素含量爲 2.00%時，葉片氮素含量爲 3.26％，去年則爲 3.25％。撒施區因植株氮含量明顯較往年低，無法與往年之 2.97%比較。全株氮含量爲 2.00％時葉片葉綠素計測值爲 40.1，較去年 38.3(2002)略高。

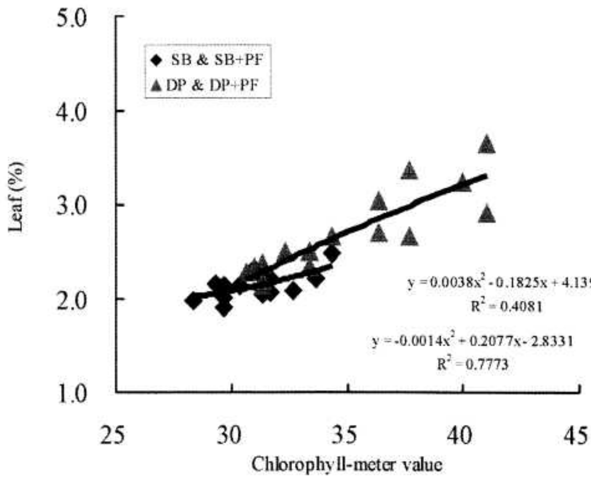


Fig.4. Relationship between chlorophyll-meter value and leaf N content at panicle initiation stage of rice grown in the first cropping season of 2003.(SB：surface broadcast；SB+PE：surface broadcast ＋ panicle fertilizer ； DP ： deep placement；DP+PF：deep placement + panicle fertilizer)

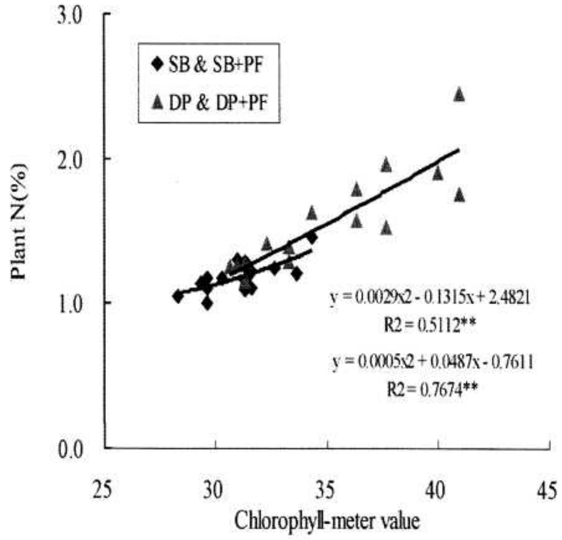


Fig.5. Relationship between chlorophyll-meter value and plant N content at panicle initiation stage of rice grown in the first cropping season of 2003.(SB：surface broadcast；SB+PE：surface broadcast ＋ panicle fertilizer ； DP ： deep placement；DP+PF：deep placement + panicle fertilizer)

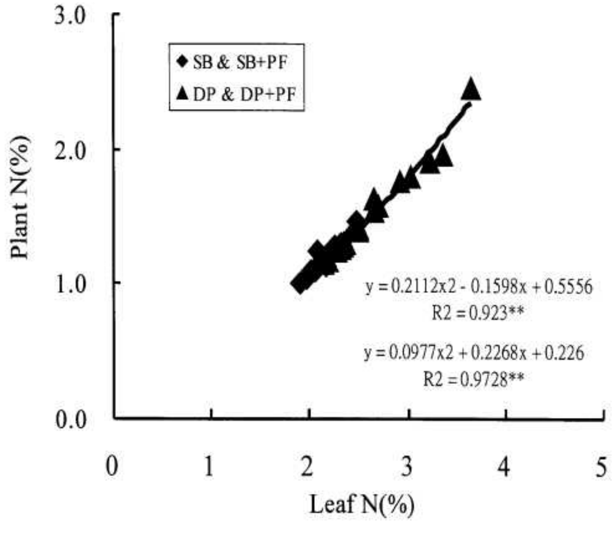


Fig.6. Relationship between leaf N content and plant N content at panicle initiation stage of rice grown in the first cropping season of 2003 first crop.(SB：surface broadcast；SB+PE：surface broadcast ＋ panicle fertilizer ； DP ： deep placement；DP+PF：deep placement + panicle fertilizer)

圖7及圖8顯示隨著幼穗形成期全株氮素的含量增加，幼穗形成期增施35公斤/公頃穗(氮)肥對水稻稻谷的增加量及增產率下降。施穗肥的增產率除了深施區之最高氮肥處理區爲減產1%外，甚至高達28%、33%、23%及11%(撒施區)(表4)，及47%、18%及20%(深施區)(表5)。張及楊(1966)指出肥料分施在第一、二期作其產量均較慣行法爲佳，一期作增產原因爲每穗粒數及千粒重之增加。栽植密度亦能增產，其產量之提高乃得自單位面積總穗數之增加。本試驗穗(氮)肥的增產效果高於鄭(1967)報告之：施用穗肥之處理，不論一期或二期作均較不施穗肥之處理稻穀產量高，在前期施用75公斤/公頃氮肥之情況下，一期作增產量均在10%以上，惟二期作之增產量較一期作高。其原因可能因本期作水稻幼穗形成期以後下雨日數明顯較往年少，僅爲16.0天，而過去10年的平均值則爲23.2天，天候狀況較佳，有利谷粒生產。另外因應深施區氮肥的流失量較撒施區少(表10及表11)插秧時如已施用較高氮肥用量(N 112公斤/公頃)，於幼穗形成期施穗(氮)肥，反而造成植株在生育後期吸收過量氮素，爲同化這些吸收之氮素將影響碳水化合物移至谷粒的量，不利谷粒生產。與前人之報告相符(王，2002；鍾等，1999)。由圖中之相關方程式計算可知，深施區水稻幼穗形成期全株氮素含量達1.95%(圖7)及1.86%(圖8)時，施穗(氮)肥無增產效果。連(1972)之報告指出穗肥之效果和幼穗形成期之植物體全氮含量具有顯著的負相關，第一期作時幼穗形成期之植物體全氮含量如低於1.8-1.9%，則穗肥之效果顯著，反之則否。惟此基準似因環境而稍異，如台北試驗結果，較屏東略高，爲2.0%左右。因此，本試驗之結果與前人之研究結果相接近。此外，由於幼穗形成期葉片葉綠素測值與全株氮含量呈極顯著正相關，故利用葉綠素計測值可供此時期現場診斷植株氮營養推薦穗(氮)肥用量之依據。

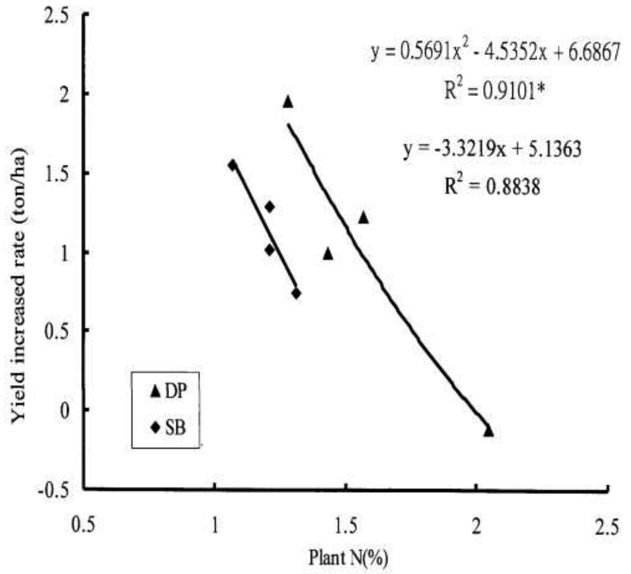


Fig.7. Difference in relationships between plant N content and yield increased rate caused by whether or not application of nitrogen fertilizer at panicle initiation stage of rice grown in the first cropping season of 2003.(SB : surface broadcast ; DP : deep placement)

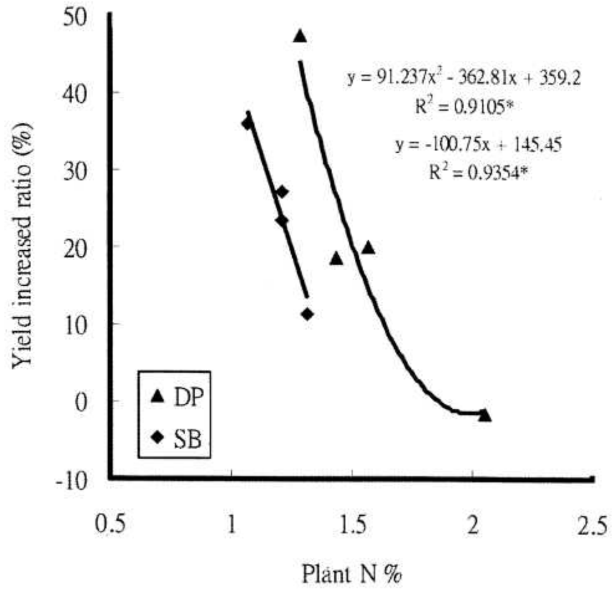


Fig.8. Difference in relationships between plant N content and yield increased ratio caused by whether or not application of nitrogen fertilizer at panicle initiation stage of rice grown in the first cropping season of 2003. (SB : surface broadcast ; DP : deep placement)

四、結語

深施區水稻之乾物產量、谷粒產量、全氮素吸收量及谷粒氮素量均較傳統撒施區高。幼穗形成期增施穗(氮)肥明顯增加水稻生育中後期氮素吸收量、乾物產量、氮素收穫指數及收穫指數，故明顯提高谷粒產量。惟因深施區水稻氮素吸收效率高，在較高氮肥用量區增加穗(氮)肥對全乾物產量及谷粒產量均有不利影響。

水稻幼穗形成期全株氮含量達 1.86~1.95 ％時，施穗(氮)肥無增產效果，此與前人之結果相近。幼穗形成期葉片葉綠素計測值與全株氮含量呈極顯著正相關，可供此時期現場診斷植株氮營養推薦穗(氮)肥用量之依據。

五、誌謝

本研究承蒙行政院農委會農業試驗所計畫經費(90 農科-4.1.1-農 C2(Z)，p1 農科-5-1.3-農 C2(Z) ，p2 農科-1.1.6-農-C1(Z))支持，特以誌謝。

六、引用文獻

王文華。1983。水田尿素深施對氮素移動、揮失、淋失及肥效之影響。國立中興大學碩士論文。

王鐘和。1993。轉作田玉米栽培技術及氮素營養管理。國立台灣大學農業化學研究所博士論文。

王鐘和、王銀波。1997。葉綠素計測值與不同生育期水稻及玉米葉片氮素含量、葉綠素含量及全株氮素含量之相關研究。國科會計劃年度報告(未發表)。

王鐘和、林毓雯、艾慶平、丘麗蓉。2001。不同氮素營養對水稻生育之影響研究。農試所九十年度計劃研究報告(未發表)。

王鐘和、林毓雯、丘麗蓉、陳琦玲、劉滄棽。2002。不同氮素營養對水稻生育之影響及穗肥診斷基準研究。農試所九十一年度計劃報告(未發表)。

王鐘和、林毓雯、黃維廷、江志峰。2002。水稻合理施肥技術。p.11-24。作物合理化施肥技術研討會專刊。中華永續農業協會、農業試驗所編印。臺中縣。

王鐘和、艾慶平、丘麗蓉、林毓雯、鍾仁賜。2002。施用不同有機資材對玉米、水稻輪作物生產之影響。p.181-218。農業土壤生態品質及生產力研討會【水旱田輪作系統及有機質應用對土壤品質及生產力之影響】論文集。中興大學土壤環境科學系、中華土壤肥料學會編印。臺中市。

王守林、彭根元、蘇寶林，1986。應用 15N 示蹤技術對北京春稻氮素效應的研究。北京農業大學學報 15(4):391-396。

洪崑煌、劉天斌。1979。不同時期所施肥料氮利用率與稻穀收量之關係。台灣大學農學院研究報告，19(1)：1-18。

連 深。1972。水稻之穗肥效應及診斷研究。農業研究 21(1)71-77。

連 深。1982。水稻之植物營養研究發展。p.45-47。台灣省土壤肥料學會三十周年紀念特刊。

連 深、王鐘和。1983。長期連用矽酸爐渣對水稻收量和土壤化學性質之影響。中華農業研究 32(2)：185~199。

連 深。1996。作物施肥手冊-貳、施肥原則及參、水稻。p.10~31。農委會及農林廳編印。

連 深、鄭榮賢、蘇春濤。1977。省產裹硫尿素及硫酸銨簡化施肥法在不同水田之肥效，台灣省農業季刊 13(2)：135-148。

莊作權。1993。台灣水田土壤在施用尿素及土壤改良劑下對水稻產量及養分含量與土壤肥力之影響。中華農學會報新 159 期: 61-74。

張萬來、楊謙遜。1966。水稻肥料分施與栽植密度對產量,產量構成因子及其他主要農藝性狀之效果(三)。中華農業研究 15(1)：1-7。

陳建山、黃定鼎、劉大江，1981。機插水稻之生育與生理研究。I.氮素、葉綠素及非構造性碳水化合物之濃度變化。中華農業研究 30(2):89-98。

詹元佑。1977。應用 ^{15}N 追蹤劑研究土壤礦化氮對水稻氮素吸收之影響。台灣糖業研究所研究彙報，76：13-18。

鄒運豐、林順台。1980a。水稻氮肥機械深施試驗。p.35-42。農林廳 68 年土壤肥料試驗報告。

鄒運豐、林順台。1980b。水稻三要素機械化深層施肥試驗。農林廳 68 年土壤肥料試驗報告(抽印本)。

謝慶芳、黃山內。1976。水稻氮素肥料效率改進試驗。P.22-260 台灣省政府農林廳土壤肥料試驗報告 22-26。

鄭榮賢、羅瑞生、王明茂。1982。巨粒尿素深施觀察。農林廳 71 年度土壤肥料試驗示範報告(抽印本)。

戴登燦，1990。不同時期所施氮肥對水稻氮素吸收與分配動態之影響。國立中興大學農藝研究所碩士論文。66pp.。

鍾仁賜、王鐘和、王俊文、王銀波。1999。不同施肥下水稻之生長及氮素吸收與分佈。土壤與環境 2(1):65-760。

深山政治。1990。水稻の最適窒素保有量と土壤窒素吸收パターンから見ん施肥。水田土壤窒素の無機化と施肥(日本土壤肥料學會編)pp.63-97。

石塚喜明、金雄桂。1967。トウモロコシの營養生理的研究(第一報)生育に伴う同化產物の生成と養分吸收に關する研究。日本土肥誌 38：11：407-412。

Calvert, D.V. and J.T.Pesek. 1964. Corn recovers N from deep in soils.Crops Soils 12 : 21 Cited from Olson R.A(1979)Isotope studies on soil and fertilizer nitrogen.p.25 in"Isotopes and Radiation in Research on Soil-Plant Realationships".IAEA,Vienna.

Chabalier,P.F. and J.Pichot. 1979. Utilization of fertilizer nitrogen by maize crop in the lvory Coast. p.33 *In*: "Isotopes and Radiation in Research on Soil-Plant Relationships".IAEA,Vienna.

Chau, N.M. and P.S. Deshmukh. 1991. Nitrogen induced physiological changes in lowland rice. Oryza28:205-209.

Dingkuhn, M., S.K. De Datta, C. Javellana, R. Pamplona and H.F. Schnier. 1992a. Effect of late-season N fertilization on photosynthesis and yield of transplanted and direct-seeded tropical flooded rice. I. Growth Dynamics. Field Crops Res. 28:223-234.

Dingkuhn, M., S.K. De Datta, R. Pamplona, C. Javellana and H.F. Schnier. 1992b. Effect of late-season N fertilization on photosynthesis and yield of transplanted and direct-seeded tropical flooded rice. II. A canopy stratification study. Field Crops Research 28:235-249.

Gass,W.B., G.A.Peterson, R.D.Hauck and R.A.Olson. 1971. Recovery of residual nitrogen by corn(*Zea mays* L.)from various soil depths as measured by N tracer techniques. Soil Sci. Soc. Am. Proc.35 :

290-294.

Genshichi, W. and P. C. Cruz. 1990. Nitrogen response of rice varieties with reference to nitrogen absorption at early growth stage. Jpn. J. Crop Sci. 59 : 540-547.

Hayami, A. 1975. Cropping sequences and their effect on soil fertility, FFTC Tech. Bull. No. 23.

Ku,S.B., M.R.Schmitt and G.E.Edwards. 1979. Quantitative determination of RuBP carboxylase-oxygenase protein in leaves of several C3 and C4 plants.J. Exp.Bot.30 : 89-98.

Mae, T. and K. Ohira. 1981. The remobilization of nitrogen related to leaf growth and senescence in rice plants(*Oryza Sativa* L.). Plant & Cell Physiol. 22:1067-1074.

Norman, R. J., D. Guindo, B. R. Wells and C. E. Wilson, Jr. 1992. Seasonal accumulation and partitioning of nitrogen-15 in rice. Soil Sci. Soc. Am. J. 56 : 1521-1527.

Su, N.R. 1975. Fertilizers applications to rice in Taiwan, ASPAC FFTC Extension Bull. No.60.

Tanaka, A., J. Yamaguchi, S. Miura and H. Tamaru. 1984. Comparison of fertilizer nitrogen efficiency among field crops. Soil Sci. Plant Nutr. 30(2) : 199-208.

Tripathy, B.N. and R.M. Upadhyay, 1989. Effcet of biocide and fertilizer application on the nutritional status of rice. Oryza 26:43-47.

Wallace, D. H. and R. W. Zobel. 1982. The bilolgy of crop yield. In Hand-book of agricultural productivity. Volume I : Plant productivity (M. Rechcigl, Jr. ed.). CRC press, Florida.

Yoshida, S. and V. Coronel. 1976. Nitrogen nutrition, leaf resistance and leaf photosynthetic rate of the rice plant. Japan Soc. Soil Sci. Plant Nutr. 22:207-211.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute. Los Banos, Philippines.

Response of Rice Yield to Deep Placement of Fertilizer and Nitrogen Top-dressing During Panicle Initiation Stage and Its Diagnosis

Chong-Ho Wang*, Yu-Wen Lin, Li-Rong Chiu, Chi-Ling Chen and Tsang-Sen Liu

Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC

E-mail: chwang@wafeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

The response of rice yield to deep placement of fertilizer and nitrogen top-dressing during panicle initiation stage has been investigated, and a study to develop a simple scheme for diagnosing the demand of nitrogen top-dressing during panicle initiation stage also has been evaluated. The results are as follows. Deep placement of nitrogen fertilizer promoted nitrogen uptake, gram nitrogen and nitrogen harvest index, and resulted in a higher dry matter production, harvest index and consequently a higher grain yield of rice plant. Top-dressing of nitrogen at panicle initiation stage had favorable effects on the nitrogen uptake, dry matter production, nitrogen harvest index, harvest index and grain yield of rice plant. Nitrogen top-dressing at panicle initiation stage increased the efficiency of fertilizer-N absorption. The response of rice plants to panicle fertilizer were observed and were found well correlated with the nitrogen content in the plants during panicle initiation stage, i.e. the lower the nitrogen content in the plants the higher the response of the plants to the top-dressing. The critical nitrogen contents for obtaining positive yield response as observed were about 1.86~1.95 %. Since the chlorophyll-meter value had significantly positive relationships with both leaf N % and plant N % of rice plant at panicle initiation stage, chlorophyll meter may serve as a suitable tool for determining the necessity of top-dressing panicle fertilizer.

Key words：Rice, Fertilizer deep placement, Panicle fertilizer.

水稻精準農業體系
土壤肥力診斷在水稻精準施肥管理之應用
121-132, 2003

土壤肥力診斷在水稻精準施肥管理之應用

王鐘和[*1]、江志峰[1]、申雍[2]
[1]行政院農業委員會農業試驗所農業化學組
[2]國立中興大學土壤環境科學系
E-mail: chwang@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 122
一、前言 ---------- 122
二、方法簡述 ---------- 123
三、結果與討論 ---------- 124
四、結論 ---------- 130
五、誌謝 ---------- 131
六、引用文獻 ---------- 131
ABSTRACT ---------- 132

土壤肥力診斷在水稻精準施肥管理之應用

王鐘和[1*]、江志峰[1]、申雍[2]
[1]行政院農業委員會農業試驗所農業化學組
[2]國立中興大學土壤環境科學系
E-mail: chwang@wufeng.tari.gov.tw

摘　要

本研究依據現行水田土壤肥力診斷推薦施肥技術，設置氮、磷、鉀肥不同用量處理，並設置氮肥高量及磷鉀肥足量施用之農家慣用量區爲對照，探討不同肥料用量處理水稻各生育時期、階段之乾物累積及要素吸收量之變化及產量之差異。結果顯示：氮素施用 210 kg/ha 的對照區較依現行推薦用量 130 kg/ha 的各處理區，其產量增加約 18 %，推薦量區與對照區的乾物質產量相比較，抽穗期時明顯較少，達統計上的差異。較低磷肥用量區(P_2O_5 15 kg/ha)水稻在幼穗形成期至抽穗期之乾物累積量明顯較其他處理少，而氮、磷、鉀要素之吸收量此時也明顯較低，甚至抽穗期至收穫期之間之吸收量也較其他處理低，而高量肥料區之水稻在抽穗期時已生產大量乾物及吸收多量氮、磷及鉀素，因而在抽穗期以後之增加量也明顯較少。水稻幼穗形成期植株之磷濃度與單位面積的穀粒數呈顯著正相關，惟其對產量的影響幅度較少，不似氮肥具有明顯的增產效應。稻穀產量與幼穗形成期植株氮含量呈極顯著正相關，顯示氮肥的影響甚大，且明顯高於磷鉀肥的影響。應用土壤肥力診斷，來推薦磷肥用量係依據前人研究之成果，爲代表各種條件之平均值，而本期作之氮條件有利於水稻生長及乾物生產，因生長量增加故對營養元素的需求也增加，因依現行土壤磷肥力診斷具較高有效磷含量，而施用較低量磷肥之處理區，水稻明顯呈現磷肥供應不足，影響水稻生育及稻穀生產。另，磷、鉀要素對水稻產量之影響明顯較氮素小。

關鍵詞：水稻　、土壤肥力診斷　、精準施肥　。

一、前 言

水稻爲臺灣地區栽培面積最多的作物，合理之肥培管理除了其經濟意義外，積極的更有維護生態環境之意義。水稻的生育受品種、氣候環境、栽培方法及土壤肥力等因素影響，本省已往亦累積相關之試驗結果釐訂有稻田之氮肥、磷肥及鉀肥之推薦用量，使水稻之施肥推薦邁向科學化。近年來在複作制度下，由於不同作物之施肥情況截然不同，上作施肥所殘留肥分和作物殘體對次作物之養分吸收將有莫大影響(Hayami,1975)，故土壤養分之測定及作物需肥性之診斷益加重要。水稻對三要素之反應以氮素最爲敏感，氮素缺乏則發育不良，產量不高，但施用過量，或施用時期不當，易因生長過旺導致罹患病蟲害或引起倒伏而減產。水稻自播種至收穫之任何階段均可吸收

氮素。前人研究(張和洪，1979)指出以含有穩定低濃度氮素的養液栽培水稻，已能使水稻生長良好，但就各生育階段所吸收氮素對稻穀生產之效率而言，則以分蘗盛期及幼穗形成期爲最大。分蘗盛期及幼穗形成期氮素養分充足與否，影響穗數、稔實率及千粒重，因此欲穫高產，必需在這兩個時期充分供應氮素肥料。

對大多數禾本科作物而言，產量構成要素之組成相似，各要素間具有互補性(Dofing and Knight,1994)，經由產量構成要素之調查，可進一步瞭解稻穀生產之豐歉程度。每個產量構成要素在植株全生育期中有其決定之特定時期，移植栽培制度下，單位面積之穗數取決於分蘗數，該數主要決定於分蘗盛期，有效分蘗數增加可促進稻穀產量的增加;水稻穎花爲乾物質積儲之場所，穎花數多寡爲產量收穫之基礎，每穗穎花數決定於生殖生長期時(尤其在枝梗和穎花分化朝時)，單位面積穎花數會受到栽培方式、生長特性及氣候條件等因子的影響;稔實穀粒數爲產量高低之決定因子，稔實率由抽穗前後環境所決定，高氮肥施用、溫度太高或太低及低日射量皆會導致不稔實率(sterility percentage)增加;穀粒之碳水化合物受稻穀(穎花)所包覆，因穀粒大小較爲固定，故千粗重爲一穩定且變異程度較小之水稻品種特性(張和曾，1982)。收穫指數(harvest index)爲另一影響產量之性狀，不論水稻、小麥或玉米等作物，其收穫指數皆因品種不同而有所差異，收穫指數是品種特性之一(朱，1975)，但也會受到環境因子(土壤肥力、栽植密度、水分、氣候條件及生長季節)的影響。

水稻的肥料需要量受到品種、栽培技術、環境（含氣候環境及土壤環境），我國現行水稻施肥技術，係考量品種特性及氣候環境等因素，配合土壤養分速測方法之研究，求得施肥效應與土壤有效磷、鉀含量之相關，爲磷、鉀需要量推薦之依據。根據前人累積之試驗結果，乃有三要素用量標準（Su, 1972、1975）；其中氮素係以品種別、期作別和土類別推薦，而磷鉀則依據土壤有效磷、鉀之測值推薦。此等標準並經前農林廳肥料技術小組定期修訂，編印施肥手冊（作物施肥手冊，1996）提供推廣人員及農友應用。本試驗依循該手冊規定進行土壤肥力診斷，並據以設置各種肥料用量試區，另參考農家慣常氮肥施用量設置氮、磷、鉀肥高量施用區作爲對照，以驗證及探討應用現行水稻栽培肥力診斷推薦施肥技術對水稻臺農 67 號生育及稻穀生產之效應。

二、方法簡述

(一)試驗地點：

農業試驗所精準農業試驗田區，81 和 83 號田(砂頁岩非石灰性新沖積土，七塊厝系)，各田區之半(25×100 m)劃分爲 12.5×12.5 m 之 16 塊小試區，供土壤肥力診斷推薦磷、鉀肥用量，另半區(25×100 m)則分爲 4 塊 25×25 m，爲農家傳統施肥區，各試區之土壤肥力狀態與性質，如表 1，兩塊田面積合計 1 公頃。

Table 1. Soil Fertility and properties in the experiment (2003 1st crop)

	pH (1:1)	$EC_{1:1}$ x ($\mu S\ cm^{-1}$)	OM y (%)	Bray 1 P z ($mg\ kg^{-1}$)	Exch. K* ($mg\ kg^{-1}$)	Exch.Ca* ($mg\ kg^{-1}$)	Exch. Mg* ($mg\ kg^{-1}$)
Min	4.9	45.2	0.85	6.87	34.0	576	83.5
	≀	≀	≀	≀	≀	≀	≀
Max	6.3	155	1.47	41.2	86.5	1218	139

x：electrical conductivity of 1:1 soil/water mixture.
y：organic matter
z：available P
*：exchangeable K, Ca, Mg

(二) 試驗作物：水稻 (*Oryza sativa* L.)臺農 67 號。

(三) 試驗方法：

本試驗各將兩塊田四個不等量氮肥區自東西向劃分成一半，一半爲對照區(CK)其施肥量爲農民慣施量 N：P_2O_5：K_2O 爲 210：70：70 kg/ha 的施用水準量，另一半則在劃分成 16 小區，每一小區面積約 0.0156 公頃，肥料施用量，因兩試區之土壤有機質含量均不高，故氮素採現行一期作水稻之推薦量 130 kg/ha，磷鉀素則依其磷、鉀肥力測值，參照本省「作物施肥手冊」中水稻部份推薦量，磷肥分別區分 15、30、50 kg/ha 的等級(如表 2)(作物施肥手冊，1986)，分別以 P_{15}、P_{30}、P_{50}表示，鉀肥則區分爲 15、40 kg/ha 的等級(如表 3)(作物施肥手冊，1986)，分別以 K_{15}、K_{40} 表示。施肥方法除磷肥採基肥全量施用外，氮肥採基肥 25 %，第一次追肥 20 %，第二次追肥(穗肥) 30 %，第三次追肥 25 % 量的施用，鉀肥採基肥 40 %，第一次追肥 20 %，第二次追肥(穗肥) 40 % 量的施用。

Table 2. Recommended P_2O_5 rates in the experiment of soil P fertility diagnosis(2003 1st crop).

Phosphorus (Bray P-1)	ppm(μg g^{-1}) in soil	5.1～12.0	12.1～30.0	〉30.0
	Relative level	Medium	High	Very high
Recommended P_2O_5 (kg ha^{-1})		50	30	15

Table 3. Recommended K_2O rates in the experiment of soil K fertility diagnosis (2003 1st crop).

Potassium (Ammonium Acetate, pH 7)	ppm(μg g^{-1}) in soil	31～50	＞50
	Relative level	Medium	High
Recommended K_2O (kg ha^{-1})		40	15

(四) 試驗時間：2003 年水稻第一期作。

(五) 調查及分析項目：

1.調查分蘗盛期、幼穗形成期、抽穗期、成熟期之植體地上部乾物重及氮、磷、鉀要素含量。

2.收穫期之植體每叢穗數、百粒重、穗粒數及其他農藝性狀。

三、結果與討論

(一)不同肥料處理對稻穀產量及收量構成要素的影響

各處理區水稻稻穀產量及收量構成要素的資料列於表四，每叢穗數以高量肥料量 $N_{210}P_{70}K_{70}$（CK）處理之 19.1 穗爲最高，較其他依現行水稻肥料推薦量施肥之各處理區平均之 17.0 增加約 12 %，顯示肥料用量增加可促進植株分蘗，增加每叢穗數，前人報告也指出水稻生育明顯受到肥料用量之影響，尤其是氮肥，其施用量與穗數成正比（王等，2002a；連，1996；張及楊，1965），該處理稻穀產量也高於其他推薦量處理區之平均約 18 %。值得注意的是推薦量處理中每穗粒數以 $N_{130}P_{15}K_{15}$ 處理爲最低，平均每穗 86 粒，因而

其產量也較低。合併各處理，分別比較不同磷、鉀肥處理對於稻穀產量與收量構成要素的影響，如表 5 及表 6，表 5 中 $N_{130}P_{15}$處理每之穗粒數較低，但其產量與 $N_{130}P_{30}$ 和 $N_{130}P_{50}$ 無差別，而不同鉀肥用量處理中，$N_{130}K_{15}$ 處理與 $N_{130}K_{50}$ 處理間則無明顯差異(表 6)，$N_{210}P_{70}K_{70}$(CK)處理之稻穀產量明顯較高，應與其氮肥用量較高有關，而非較高鉀肥的影響。由以上之資料可知；若是依循現行水田土壤診斷技術判定具有較高磷肥力的田區，據此而推薦較少磷肥的用量，反而有磷供應不足，而影響稻穀產量的現象。

由於今年一期作水稻生育期間的氣候條件與過去十年的平均值相較，降雨日數較過去十年同期平均減少 7.5 天，水稻幼穗形成期以後下雨日數明顯較往年少，僅為 16.0 天，而過去十年的平均值則為 23.2 天，因此本期作天候狀況較佳，有利穀粒生產(表七)。所以雖然高量氮素(210 kg/ha)施用區之水稻植株生長甚茂盛，甚至稻株相互擁擠，但在良好的氣候條件下，並未有如倒伏及病蟲害明顯滋生的現象生長，故有較高產量(王，1985；連，1982、1996；王等，2002b)。

Table 4. Effect of different fertilizer treatments on the yield and yield components of rice.

Treatment	Panicle number per hill	Grain number per panicle	Hundred grain weight (g)	Grain yields (kg ha^{-1})	Harvest index (%)
$N_{130}P_{15}K_{15}$	16.3^y	86	2.31	6026	48.2
$N_{130}P_{15}K_{40}$	16.7	107	2.30	6819	47.4
$N_{130}P_{30}K_{15}(11^x)$	$16.8(1.6^z)$	104(10)	2.39(0.12)	6124(605)	49.6(1.3)
$N_{130}P_{30}K_{40}$(13)	16.9(1.8)	106(13)	2.41(0.05)	6353(492)	49.4(2.0)
$N_{130}P_{50}K_{15}$(2)	17.8(0.2)	100(4)	2.30(0.04)	5906(674)	49.3(2.5)
$N_{130}P_{50}K_{40}$(4)	16.9(1.4)	104(9)	2.40(0.04)	6288(958)	51.4(0.7)
CK(4)	19.1(0.9)	101(9)	2.26(0.12)	7616(535)	48.3(1.8)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

Table 5. Effect of different phosphorus fertilizer application on the yield and yield components of rice.

Treatment	Panicle number per hill	Grain number Per panicle	Hundred grain weight (g)	Grain yields (kg ha^{-1})	Harvest index (%)
$N_{130}P_{15}(2^x)$	$16.5^y(0.2^z)$	96(15)	2.31(0.01)	6423(561)	47.8(0.6)
$N_{130}P_{30}$(24)	16.9(1.7)	105(11)	2.40(0.09)	6248(547)	49.5(1.7)
$N_{130}P_{50}$(6)	17.2(1.2)	103(7)	2.37(0.06)	6161(825)	50.7(1.6)
CK(4)	19.1(0.7)	101(14)	2.23(0.12)	7616(535)	48.3(1.8)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

Table 6. Effect of different potassium fertilizer application on the yield and yield components of rice.

Treatment	Panicle number per hill	Grain number Per panicle	Hundred grain weight (g)	Grain yields (kg ha^{-1})	Harvestindex (%)
$N_{130}K_{15}(14^x)$	$17.0^y(1.5^z)$	103(10)	2.37(0.12)	6086(569)	49.5(1.4)
$N_{130}K_{40}$(18)	17.0(1.6)	106(11)	2.40(0.05)	6365(589)	49.7(2.0)
CK(4)	19.1(0.7)	101(14)	2.23(0.12)	7616(535)	48.3(1.8)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

Table 7. Days of precipitation during the crop season and compare with past 10 years (day).

Days after transplanting (DAT)	2003	1993-2002
1-120	35	42.5
1-30	9	8.3
30-60	10	11
60-84	6	8
84-120	10	15.2

(二)不同生育時期的乾物產量及氮磷鉀要素吸收量之比較

不同肥料處理間水稻各生育時期之乾物質產量如表 8，分櫱盛期時各處理間乾物質產量並無顯著差異，此乃因分櫱盛期時各處理區植株生長之乾物量甚少，僅約為收穫時之 2％左右，因此對營養元素之需求較低，來自土壤中營養元素及所施的肥料所供應之營養元素的量，已足以滿足水稻生長所需之故。

Table 8. Effect of different fertilizer treatments on the dry matter yield of rice at various growth duration (g plant^{-1}).

Treatment	30 DAT*	60 DAT	84 DAT	120 DAT
$N_{130}P_{15}K_{15}$	1.47^y	23.3	39.8	66.9
$N_{130}P_{15}K_{40}$	1.36	32.0	48.4	86.4
$N_{130}P_{30}K_{15}$(11^x)	1.26(0.32^z)	20.0(2.8)	43.1(2.1)	85.3(2.6)
$N_{130}P_{30}K_{40}$(13)	1.24(0.21)	19.1(3.0)	45.1(2.1)	87.7(2.7)
$N_{130}P_{50}K_{15}$(2)	1.19(0.72)	16.3(1.0)	45.1(5.6)	83.2(1.1)
$N_{130}P_{50}K_{40}$(4)	0.99(0.44)	20.5(3.1)	43.7(5.7)	82.4(2.1)
CK(4)	1.35(0.46)	29.1(0.9)	62.3(4.2)	88.6(2.4)

^{x}：number of replicate ^{y}：average of replicate ^{z}：standard deviation of replicate
*：DAT, days after transplanting

幼穗形成期時，水稻生長量已明顯增多，根系發達且分佈廣(Broadbent and Mikkelsen, 1968)，對養分的需求量較前期高，分櫱數顯著增加，水稻葉面積增大以提高光合作用速率，植體總乾物重比分櫱盛期激增 14 至 23 倍，而磷鉀肥用量較少之 $P_{15}K_{15}$ 處理抽穗期及收穫期植株乾物質產量則明顯較其他處理低(表 8)。比較不同磷肥用量處理，顯示 P_{15}(每公頃施 P_2O_5 15 公斤)處理之水稻在幼穗形成期至抽穗期之期間乾物質增加量顯著低於其他處理(圖 1)，而不同鉀肥用量處理對乾物質產量之影響(圖 2)，則無此情形。由於磷素牽涉細胞多項重要生理功能如能量代謝等，於作物生殖器官在生長分化時尤為重要(王，1985；Mengel and Kirkby, 1982)，推測水稻幼穗形成期至抽穗期係穗部分化的重要時期，需要多量的磷素供應穗部組織生長分化所須的，若依現行磷肥力診斷具較磷肥力區，而推薦較低的磷肥用量，顯然至此一時期無法提供足量的有效磷給水稻生長利用。抽穗期以後時植體總乾物質重的增加趨於緩和，除 CK 處理增加較少僅為 26.3g 外，各處理間差異不大，約介於每株 39.8 至 48.4g 之間。

圖 3 中也顯示較少磷用量區 P_{15} 水稻在生育中後期之幼穗形成期至抽穗期之期間，以及抽穗期至收穫期之期間，氮素之吸收明顯較其他處理少，而 CK 處理水稻在抽穗期已吸收累積大量氮素，明顯高於其他處理，因而在生育後期氮素吸收量也較少。而不同鉀肥用量對氮素吸收之影響則顯示 $N_{130}K_{15}$ 及 $N_{130}K_{40}$ 兩處理間並無差異，$N_{210}K_{70}$ 處理因氮肥用量較多，故氮素吸收量也明顯較多(圖 4)。

圖 5 中也顯示較低磷肥用量區(P_{15})水稻在幼穗形成期至抽穗期之期間磷的吸收量明顯低於其他處理，而高量肥料處理（CK），則

因在抽穗期已吸收大量磷素，故在抽穗期之後之吸收量也明顯較少。而不同鉀用量處理則對磷吸收並無明顯差異(圖 6)。圖 7 更顯示較少磷肥用量極明顯影響鉀素的吸收，幼穗形成期至抽穗期之期間鉀吸收量甚至減少，而 CK 處理在抽穗期植株已吸收高量的鉀素，抽穗期以後之鉀吸收量也呈負成長的情形(圖 8)。會呈現負增加現象，應爲部份老葉枯乾脫落，故測定之鉀吸收量減少，另外則因鉀素在植株中以鉀離子的型態存在，也能因雨水的淋洗，而有少量的洗失，而導致總吸收量減少。

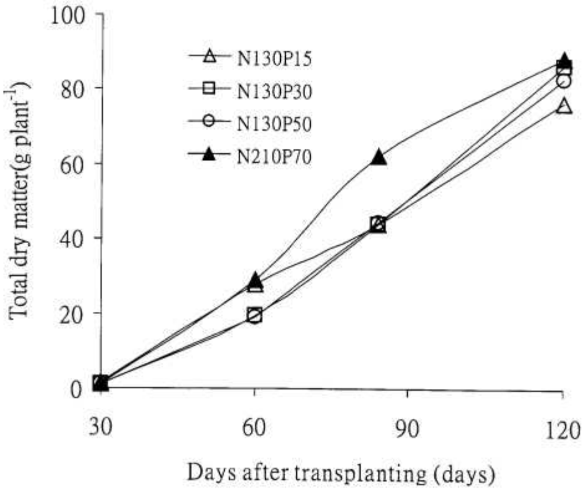


Fig. 1. Effects of different P rates on the total dry matter accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

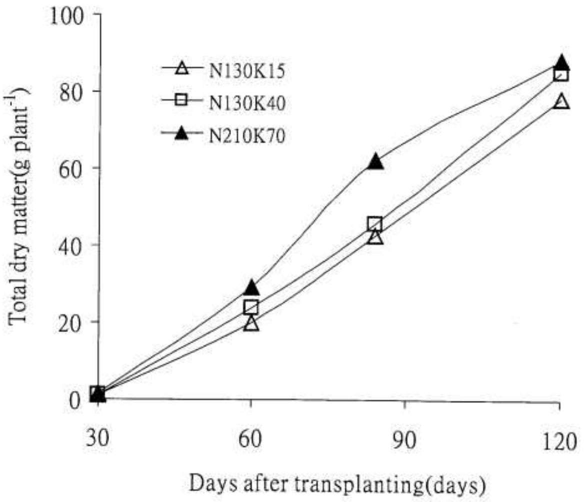


Fig. 2. Effects of different K rates on the total dry matter accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

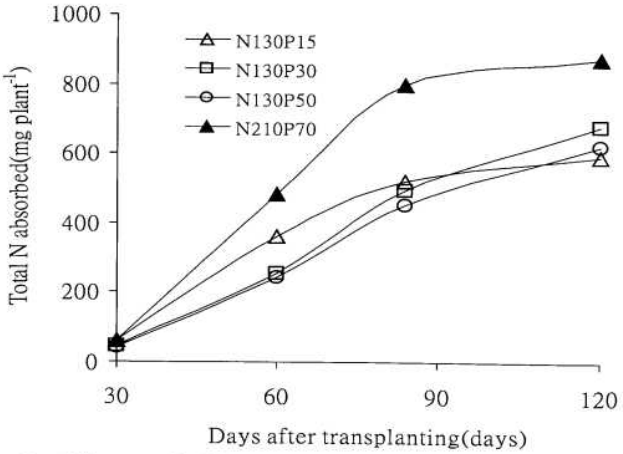


Fig. 3. Effects of different P rates on the total N accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

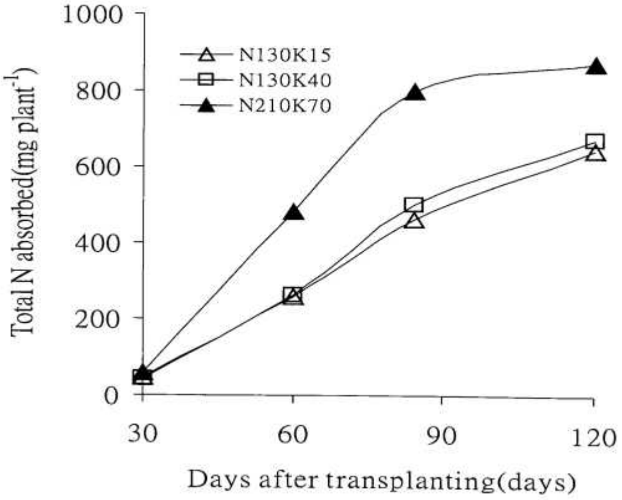


Fig. 4. Effects of different K rates on the total N accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

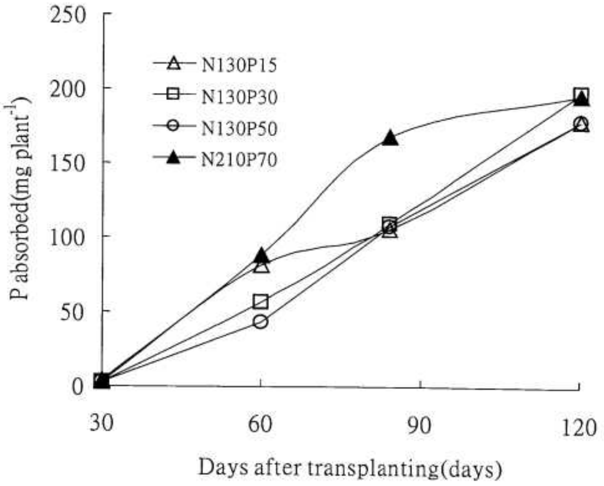


Fig. 5. Effects of different P rates on the P accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

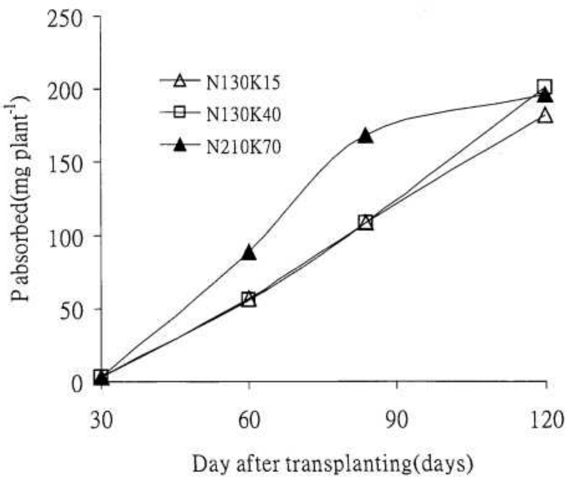


Fig. 6. Effects of different K rates on the P accumulated of rice at various growth stage (1st crop, 2003).

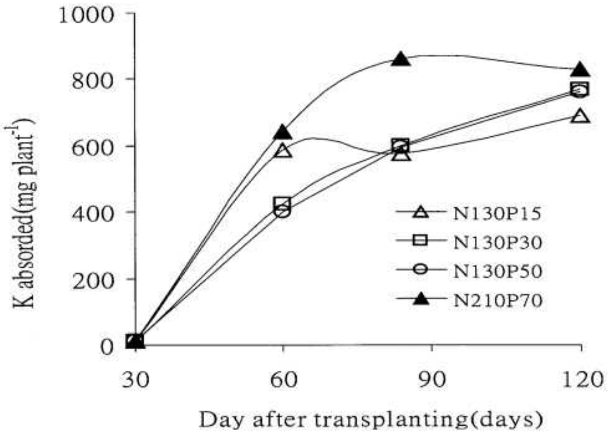


Fig. 7. Effects of different P rates on the K accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

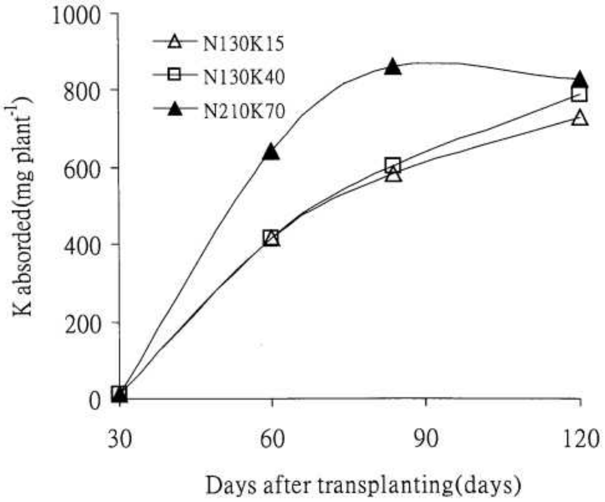


Fig. 8. Effects of different K rates on the K accumulated of rice at various growth stage (2003 1st crop).

（三）各生育階段乾物增加量之比較

表 9、表 10、表 11 及表 12 中，分別比較不同生育階段各處理區水稻之乾物累積量及氮、磷、鉀要素的吸收量，顯示較低磷肥用量區水稻在幼穗形成期至抽穗期之乾物累積量明顯較其他處理少，而氮、磷、鉀要素之吸收量此時也明顯較低，甚至抽穗期至收穫期之間之吸收量也較其他處理低。而高量肥料區之水稻在抽穗期時已生產大量乾物及吸收多量氮、磷及鉀素，因而在抽穗期以後之增加量也明顯較少。

Table 9. Effect of different P fertilizer rates on the dry matter accumulated of rice at various growth duration (ton ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}P_{15}$ (2^x)	0.24^y(0.01^z)	4.36(1.04)	2.74(0.01)	5.42(1.28)
$N_{130}P_{30}$ (24)	0.20(0.05)	3.02(0.48)	4.09(0.93)	6.98(1.22)
$N_{130}P_{50}$ (6)	0.18(0.08)	3.00(0.93)	4.17(1.41)	6.41(1.28)
CK (4)	0.22(0.07)	4.61(0.61)	5.53(1.80)	4.37(2.63)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

*：DAT, days after transplanting

Table 10. Effect of different P fertilizer rates on the total N accumulated of rice at various growth duration (kg ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}P_{15}$ (2^x)	10.3^y(1.0^z)	49.8(14.2)	26.7(1.7)	12.3(15.6)
$N_{130}P_{30}$ (24)	7.46(1.96)	35.2(5.6)	39.2(16.1)	31.2(14.6)
$N_{130}P_{50}$ (6)	6.66(3.49)	33.7(11.4)	33.2(14.3)	28.1(14.6)
CK (4)	9.85(2.97)	70.7(16.0)	31.8(16.8)	12.7(28.4)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

*：DAT, days after transplanting

Table 11. Effect of different P fertilizer rates on the P accumulated of rice at various growth duration (kg ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}P_{15}$ (2^x)	0.60^y(0.21^z)	13.0(3.3)	4.08(0.03)	12.1(2.1)
$N_{130}P_{30}$ (24)	0.47(0.13)	9.04(1.31)	8.75(2.64)	14.7(3.3)
$N_{130}P_{50}$ (6)	0.40(0.11)	8.37(2.42)	9.23(4.0)	11.8(5.8)
CK (4)	0.44(0.14)	14.3(1.9)	13.2(5.3)	4.69(7.41)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

* : DAT, days after transplanting

Table 12. Effect of different P fertilizer rates on the K accumulated of rice at various growth duration (kg ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}P_{15}$ (2^x)	2.20^y(1.40^z)	95.8(21.6)	-2.19(8.79)	19.1(3.0)
$N_{130}P_{30}$ (24)	1.93(0.66)	68.5(10.7)	29.3(18.2)	28.5(18.9)
$N_{130}P_{50}$ (6)	1.80(0.44)	64.8(20.0)	32.7(19.6)	27.3(13.7)
CK (4)	1.66(0.61)	105(18)	36.4(32.2)	-5.3(44.4)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

* : DAT, days after transplanting

而表 13、表 14、表 15 及表 16 則顯示不同鉀量處理間，水稻乾物量及氮、磷、鉀要素吸收量，以 K_{40} 略高於 K_{15}，惟其之差異較少，CK 處理有最高的乾物產量及要素吸收量，應與其施用多量氮肥有關。

Table 13. Effect of different K fertilizer rates on the dry matter accumulated of rice at various growth duration (ton ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}K_{15}$ (14^x)	0.21^y(0.06^z)	3.02(0.48)	4.00(1.24)	6.57(1.52)
$N_{130}K_{40}$ (18)	0.19(0.04)	3.15(0.80)	4.04(0.90)	6.93(1.04)
CK (4)	0.22(0.07)	4.61(0.61)	5.53(1.80)	4.37(2.63)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

* : DAT, days after transplanting

Table 14. Effect of different K fertilizer rates on the total N accumulated of rice at various growth duration (kg ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}K_{15}$ (14^x)	7.65^y(2.73^z)	35.2(5.3)	34.8(14.6)	30.4(16.9)
$N_{130}K_{40}$ (18)	7.36(2.06)	36.3(9.7)	40.0(16.4)	28.8(13.6)
CK (4)	9.85(2.97)	70.7(16.0)	31.8(16.8)	12.7(28.4)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

* : DAT, days after transplanting

Table 15. Effect of different K fertilizer rates on the P accumulated of rice at various growth duration (kg ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}K_{15}$ (14^x)	0.50^y(0.12^z)	8.93(1.48)	8.81(3.61)	12.1(4.4)
$N_{130}K_{40}$ (18)	0.44(0.14)	8.84(3.19)	8.85(3.24)	15.4(2.9)
CK (4)	0.44(0.14)	14.3(1.9)	13.2(5.3)	4.69(7.41)

^{x} : number of replicate ^{y} : average of replicate ^{z} : standard deviation of replicate

* : DAT, days after transplanting

Table 16. Effect of different K fertilizer rates on the K accumulated of rice at various growth duration (kg ha^{-1}).

Treatment	1-30 DAT*	30-60 DAT	60-84 DAT	84-120 DAT
$N_{130}K_{15}$ (14^x)	2.01^y(0.60^z)	67.1(11.4)	28.4(20.1)	23.7(17.1)
$N_{130}K_{40}$ (18)	1.86(0.70)	67.2(24.1)	31.7(27.1)	30.8(17.4)
CK (4)	1.66(0.61)	105(18)	36.4(32.2)	-5.3(44.4)

^{x}：number of replicate ^{y}：average of replicate ^{z}：standard deviation of replicate

*：DAT, days after transplanting

（四）植株要素濃度與稻穀生產之關係

圖 9 顯示水稻幼穗形成期植株之磷濃度與單位面積的穀粒數呈顯著正相關。盛澄淵等(1964)報告指出，於桃園紅壤水稻試區，於水稻齊穗期植株磷含量在 0.3％以下者，尚有增施磷肥而增產的空間，而本試驗之推薦施肥區之水稻植株在幼穗形成期之磷含量，甚多低於 0.3％(圖 9)。由於此時期以後，爲穗部分化的重要時期，顯示在穎花分化生長時，職司細胞重要功能之磷素如果缺乏，對稻穀生產將有不良的影響。惟其對產量的影響幅度較少，不似氮肥具有明顯的增產效應。此與前人的報告之磷鉀肥對水稻產量之效應明顯低於氮肥之結果相符(Chu, H.F.，1961；Lin, C.F.，1984、1985；Lian, S.，1999)。

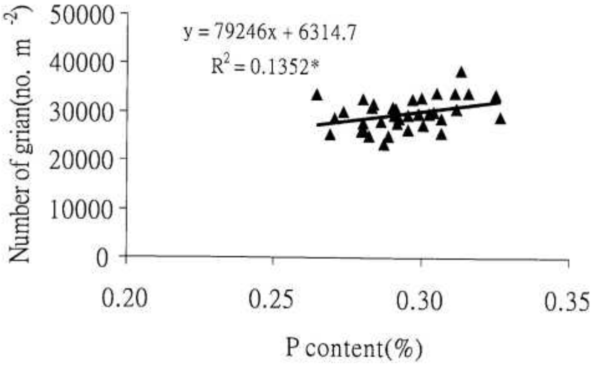


Fig. 9. Relationship between grain number per panicle and P content of rice at panicle initiation stage (2003 1st crop).

圖 10 顯示稻穀產量與幼穗形成期植株氮含量呈極顯著正相關，高量氮肥用量處理（N 210 公斤/公頃）之產量顯著高於 N 130 公斤/公頃之各處理，顯示氮肥的影響甚大，且明顯高於磷鉀肥的影響。尤其本期作植株幼穗形成期 N 130 公斤/公頃之各處理氮素含量明顯較往年的結果低，應爲受水稻生長之多量乾物質稀釋所致，本年度其他水稻試驗亦有相同之結果(王等，2003)，亦即本期作水稻生育期間較佳的氣候環境有利於水稻的生長與乾物生產，因產能提高，對營養元素的需求也增加，故本期作較現行氮肥用量推薦量增加氮素用量，仍明顯有較大的增產結果。

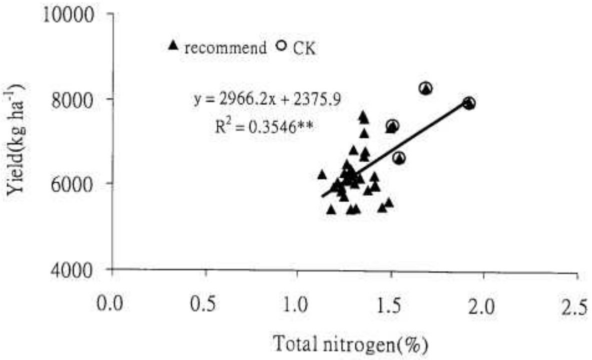


Fig. 10. Relationship between grain yield with N content of rice at panicle initiation stage (2003 1st crop).

四、結論

應用土壤肥力診斷，來推薦磷肥用量係依據前人研究之成果，爲代表各種條件之平均值，而本期作之氮條件甚有利於水稻生長及乾物生產，因生長量增加故對營養元素的需求也增加，而因依現行土壤磷肥力診斷具較高有效磷含量，而施用較低量磷肥之處理區，水稻明顯呈現磷肥供應不足，影響水稻生育及稻穀生產。磷、鉀要素對水稻產量之影響明顯較氮素小。

五、誌謝

本研究承行政院農委會補助經費(計畫編號 91 農科-5.1.3-農-C2(4))始得完成，特此致謝。

六、引用文獻

王銀波。1985。植物營養學。p.23-25。國立中興大學出版。

王鐘和、林毓雯、黃維廷、江志峰。2002a。水稻合理施肥技術。p.11-24。作物合理化施肥技術研討會專刊。中華永續農業協會、農業試驗所編印。

王鐘和、艾慶平、丘麗蓉、林毓雯、鍾仁賜。2002b。施用不同有機資材對玉米、水稻輪作物生產之影響。p.181-218。農業土壤生態品質及生產力研討會【水旱田輪作系統及有機質應用對土壤品質及生產力之影響】論文集。中興大學土壤環境科學系、中華土壤肥料學會編印。

王鐘和、林毓雯、丘麗蓉、陳琦玲、劉滄棽。2003。肥料深施及穗肥對水稻產量之效應及診斷研究。水稻精準農耕研究成果研討會論文集（編印中）。

朱鈞。1975。穀類作物高產量之生理與形態之特性。科學農業，23:104-107。

作物施肥手冊。1966。行政院農業發展委員會、臺灣省政府農林廳編印。

連　深。1982。水稻之植物營養研究發展。p.45-47。臺灣省土壤肥料學會三十周年紀念特刊。

連深。1986。參、水稻, 10-31 頁，行政院農業委員會農業試驗所，作物施肥手冊，第二版。霧峰，臺中。

張正賢、曾美倉。1982。水稻產量構成因素及其影響因子。科學農業，30:318-322。

張萬來、楊遜謙。1965。生育環境對稻穀產量及構成因素之效果。農業研究 14：2（23）。

盛澄淵、蘇楠榮、林銅鐘、馮明彬。1964。桃園紅壤磷鉀含量與水稻營養及肥料效應之關係。中華農學會報，新 48：18-34。

黃脩惠。2001。不同氮肥對水稻-玉米耕作體系中生長與養分吸收的影響。國立臺灣大學農業化學研究所碩士論文，臺北，臺灣。

黃眞生。1978。I.2 臺灣水稻第二期作低產之原因。P.29-36。謝順景、劉大江主編,臺灣二期作稻低產原因及解決方法研討會專集，行政院國家科學委員會，臺北。

Blackmore, B.S., P.N. Wheeler, J. Moris, R.M. Moris and R.J.A. Jones. 1995. The role of precision farming in sustainable agriculture : A European perspective. p.777-793. *In*: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson (eds.). ASA, CSSA, SSSA.

Broadbent, F.E., and D.S. Mikkelsen. 1968. Influence of placement on uptake of tagged nitrogen by rice. Agron. J. 60:674-677.

Dofing, S.M., and C.W. Knight. 1994. Yield component compensation in uniculm barley lines. Agron. J. 86:273-276.

Mengel,K.and E.A.Kirkby 1982 Principles of Plant Nutrition. p.437-540. published by International Potassh Institute P.O.Box, CH-3048 Wordlaufen-Berny Switzerland.

Pieerce, F.J. and E.J. Sadler (eds.). 1997. "The state of Site Specific Management for Agriculture" . ASA, CSSA, SSSA.

Su, N.R. 1972. The fertility status of Taiwan soils. *In*:"Soil of the ASPAC Region". ASPAC FFTC Tech.Bull.No.8.

Su, N.R. 1975. Fertilizers applications to rice in Taiwan, ASPAC FFTC Extension Bull. No.60.

Application and Diagnosis Technique of Soil Fertility in Precision Agriculture

Chung-Ho Wang*[1], Chih-Feng Chiang[1] and Yuan Shen[2]
[1]Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
[2]Department of Soil and Environmental Sciences, Nation Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail：chwang@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Designed according to recommendation of current soil fertility diagnosis, different rates of fertilizer trial with conventional farms' use as check is conducted to investigate yield difference and variation of dry matter accumulation and nutrients uptake various growth phases of rice. The result indicated yield in N 130 kg/ha treatment responded lower than check（N 210 kg/ha）by 18％, and during heading stage dry matter production of recommended N 130 kg/ha also significantly less than that of check. The dry matter accumulated and mineral N,P,K,. and uptake during panicle initiation stage to maturity stage of rice grown in the lowest P fertilizer rates plot (P_2O_5 15 kg/ha) were lower than other treatments. P content of rice at panicle initiation stage had significantly positive relation with grain number per unit area, but its' effect was less than the effect of N. Grain yield had significantly positive relation with N content of rice at panicle initiation stage. Derived from soil fertility diagnosis and reference experimental results, recommended rate of P_2O_5 represent an average of various conditions. As climate condition in this crop favored rice growth, nutrient demand accordingly raised for dry matter production. Thus, low P_2O_5 treatment plot diagnosed as containing abundant soil available P, was observed insufficient P supply to rice influencing its growth and grain production. Besides, influences of P and K contributing to rice yield were apparently much less than that of N.

Key words：Rice, Soil fertility diagnosis, Precision fertilization.

水稻精準農業體系
精準農耕水稻施肥決策系統之案例分析
133-144, 2003

精準農耕水稻施肥決策系統之案例分析

陳琦玲[*]、張瑞明
行政院農委會農業試驗所農化組
E-mail: chiling@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 134
一、前言 ---------- 134
二、方法簡述 ---------- 135
三、結果與討論 ---------- 138
四、結語 ---------- 142
五、誌謝 ---------- 142
六、引用文獻 ---------- 143
ABSTRACT ---------- 144

精準農耕水稻施肥決策系統之案例分析

陳琦玲*、張瑞明
行政院農委會農業試驗所農化組
E-mail: chiling@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本文係針對農委會農業試驗所精準農耕研究計畫在農試所的試驗田區(共 10.83 公頃，分為 163 個網格小區)，以水稻施肥決策系統，進行施肥決策分析。施肥決策所需的期作生產力圖，係以試驗期間試驗小區個別期作之最高產量構成。一期作各小區之生產力均可達第一級(>6.2 Mg/ha)，二期作則大部分小區可達第二級(5.2-6.2 Mg/ha)，亦有部分田區可達第一級(>6.2 Mg/ha)。試驗期間試驗田區之有效磷含量維持於極高(>28.3μg/ml P by Mehlich's No. 3) 與高等級(11.3-28.3μg/ml P by Mehlich's No. 3)，而鉀含量則維持於高(>48 μg/ml K by Mehlich's No. 3)與中(16-48 μg/ml K by Mehlich's No. 3)等級。依據決策系統之診斷與施肥推薦，二期作應可按目前施肥量減施 14%。未來藉由遙測技術之開發，提供較精準之空間資訊，將相對可獲得更精準之施肥圖。

關鍵詞: 水稻、施肥、決策系統。

一、前言

臺灣稻作單位面積產量之發展與肥料之施用密切相關;肥培技術之發展遂為臺灣稻作發展上很重要之一環(連，1999)。

肥料之施用固有提高生產和收益一面，亦有其衝擊環境之一面。蓋肥料之施用難免伴隨養分要素之流失或逸散損失，尤以不當之施肥(過量或不良的施肥方法)所致為最。由於人類對於環境及能源之危機日增，合理或適當之施肥乃受議論；其一端有排除化學肥料之施用，甚至排除一切由外投入之肥料(包括有機質肥料)者，諸如不同之有機農業及某種自足型之生態農業等。惟此等農耕方法之不具生產性甚明，因此一般都以兼顧生產性和環境保護者為主流，諸如，對環境和善的農耕(Environmentally Friendly Farming)，依地點特性調和的管理(Site Specific Management)或診斷處方的農耕(Prescription Farming)等，均係針對土壤特性、肥力或作物生產潛力、營養狀況等而適量、適法施肥為原則，以提高施肥效率，減少環境衝擊和達到生產性為目的。

臺灣稻田之施肥推薦一向都以全區多年多處舉辦之田間試驗結果為基礎，配合土壤分類、肥力測定等靈活調節，故已相當符合依地點特性調節的施肥管理原則，成績亦達一定水準。惟由於社會經濟因素之變遷，如已成過去但影響仍深的過去肥料價格穩定政策，及近年來之人工缺乏、工資上漲等，肥料之施用確有

過量和粗放傾向。據 1990-1991 年間中部地區稻田多處之調查(戴及林，1992)，農民肥料慣用量平均爲氮、磷酐、氧化鉀各 220，60，110 公斤/公頃，較試驗場所之推薦量平均氮、磷酐、氧化鉀 130，40，60 公斤/公頃，各多出許多，可見過量施肥之一斑。又因稻田多年來之磷鉀肥施用，土壤中亦有磷、鉀累積跡象(Lian, 1989)。加之，由於大量飼料之輸入，臺灣土地之養分負荷實已增大;此等飼料養分經由農畜產廢棄物排出，又難於平均分散於農地,致使局部農地亦有養分過多或水質污染等問題。爲因應上述一連串問題,除了加強機械化施肥技術之發展外,加強既有土壤診斷、施肥推薦服務亦甚重要(連，1998)。

由於資訊科技之發展與普及，美國於 1980 年代後半乃有精準農耕(Precision Farming)之提出(遛澤，2000)。依據 Robert(1997)之定義，精準農業是一種資訊及技術爲基礎的農業經營管理系統,經藉一套完善的決策系統整合串連農耕資料庫、土壤資料庫、地理資訊系統、全球定位系統、遙測科技及自動化農機變率操作系統,鑑定、分析與管理特定農田或土壤的空間與時間變異性,期能獲取最佳收益,同時兼顧環境保護,確保農業永續發展。如是,則精準農耕亦是依地點特性調節施肥之一種,惟其發展之背景則是大規模之農場(200-500 公頃)，而且作物種類單純(陳，2000)。臺灣地區稻田每塊田區之面積狹小,且長久以來每個田區已成爲施肥管理的單位,各田區間之變異既非連續,亦無自動化農機變率操作系統發揮功能之餘地。Blackmore(2000)亦質疑在小面積農田施行變量施肥之必要性。另據美國國科會(NRC)所下的定義,精準農業是一種經營管理手段,採用資訊技術分析各種來源的資料以獲得資訊,從而產生與農作生產有關的決策。如是,則廣義的精準農耕與既有依地點特性調節施肥管理的農耕方法並無甚差別,僅在資訊之擴大應用上有些差異而已。由於各方面之努力及資訊科技之應用，台灣亦有各種土壤肥力、稻田生產力等資料庫之建立。當務之急應是將既有之稻田施肥推薦系統電腦化並與上述資料庫連結,擴大資訊之取得,以建構一個較完善的施肥決策系統以供使用。

陳等(2002a)已整合前人之研究結果，建立土壤診斷、施肥推薦之基準,發展水稻施肥決策系統,可串連農耕資料庫、土壤資料庫、地理資訊系統、全球定位系統、及接受遙測科技所獲得之影像檔,並可輸出農機可接受之檔案。本文係針對精準農耕體系研究計畫之試驗田區之調查資料，依施肥決策系統之診斷基準,進行生產與肥力空間變異分析,並與早期之台灣水田一、二期作生產力圖(陳及郭,1991)及農田肥力測定之肥力圖(林，1967)進行比較。亦依多期作之產量圖繪製期作生產力圖，進行施肥決策分析。

二、方法簡述

(一)水稻施肥決策系統

目前施肥決策系統之施肥診斷基準,在氮肥方面，係考慮品種、期作、栽培方式、表土質地與生產力等因素，推薦氮肥施用量；磷、鉀肥則依土壤磷、鉀含量而推薦施肥量，鉀肥推薦量另考慮土壤排水狀況。其中土壤特性如質地與排水狀況屬於較不易變動的資料,可直接由土壤調查資料庫中查詢,但生產力圖之產生需藉累積多年之產量資料而得之，土壤磷、鉀肥力雖會變動，雖不似氮素轉化快速，仍應二、三年檢測一次，以調整其磷、鉀肥施用量，避免肥料之浪費(陳等，2002b)。

目前水稻施肥決策系統資料庫中,除了全省的土壤特性資料庫外，亦有民國 66-73 年調查的台灣稻田期作生產力圖(陳及郭，1991)與

民國 48-56 年調查的臺灣肥力測定之磷、鉀肥力圖(林，1967)，雖可提供施肥決策診斷之基本資料，但爲早期調查資料，特別是肥力狀態爲可變的，應不斷更新，以獲得合理之施肥推薦。精準農耕體系研究計畫之試驗結果，正可提供農試所試驗田區期作生產力圖與磷、鉀肥力圖之更新。

(二)水稻精準農耕體系研究計畫農試所試驗田區

水稻精準農耕體系研究計畫試驗田區位於農業試驗所農場，包括 74-89 號田與 38、39、42、43 號田，共 10.83 公頃，20 塊田區表土質地均屬於坋質壤土(粗質地)，排水等級爲良好(第一級)。爲了解肥力與產量的空間變異，每一田區分爲八個 25m*25m 小區，74 號田爲 12 個小區，各試驗區之編號如圖 1。從 2000 年至 2003 年一期作試驗期間，除了 2000 年二期作 38、42 號田種植台農 71 號外，其餘均種植台農 67 號。農場之栽培管理係由農試所農場組負責，管理作業與流程如賴等(2001)。肥料之施用，除了特殊試驗目的的田區，各期作氮、磷酐與氧化鉀施用量均爲 130、69、66 kg/ha。此施用量爲供給水稻生長之充足量，可推估田間生產潛力。肥料之施用除了深層施肥試驗外，均爲人工撒施。各試驗田區進行之試驗於結果與討論中一併討論說明。

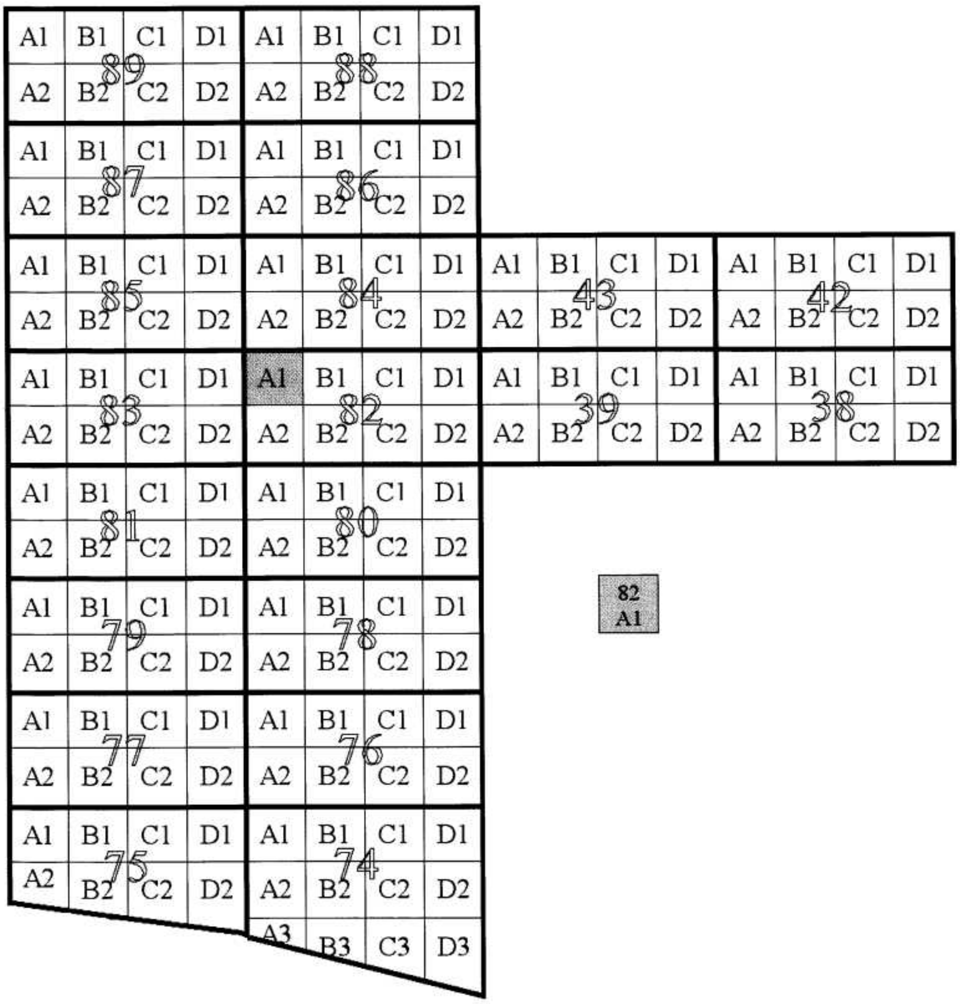


圖 1. 精準農耕農業試驗所試驗田區編號。

(三)農試所試驗田區之施肥決策分析

(1)早期調查之期作生產力圖與肥力圖

依據民國 66-73 年的產量調查，所繪製的水田生產力圖(陳及郭，1991)，農試所精準農耕試驗田區在一期作爲第一等級 (>6.2 Mg/ha)，而二期作爲第三級 (5.44-5.87 Mg/ha)(水田生產力共分 10 級)，即屬於現在施肥決策系統生產力等級之第二級，如圖 2。係因當時的調查，在考慮人力資源下，僅 10 公頃左右採一土樣，因此整個試驗田區均屬同一等級。

依據民國 66-73 年調查結果所繪製之臺灣省稻田肥力測定之肥力圖(林，1967)，農試所精準農耕試驗田區之磷肥力(Bray No.l)均屬高級，鉀肥力(Mehlich No.1)則屬中級。採樣密度亦爲 10 公頃左右採一土樣，因此與生產力等級相同，整個試驗田區都屬於同一等級。

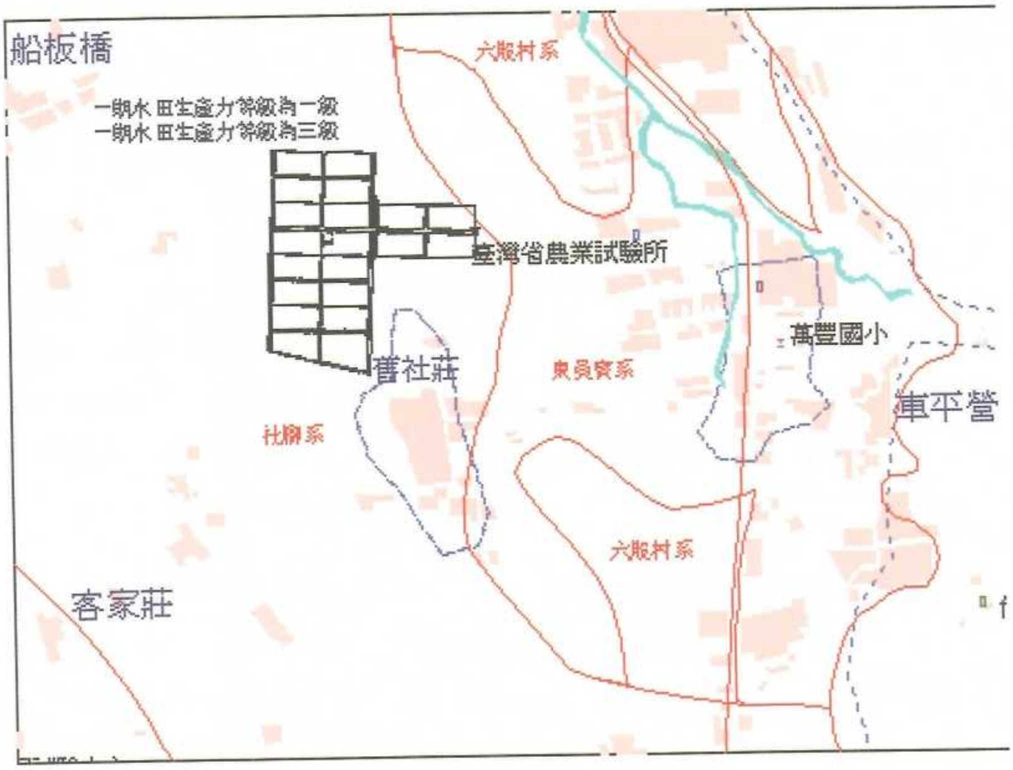


圖 2. 台灣稻田生產力分級(1991)之農試所精準農耕試驗田區一、二期作生產力等級圖。

(2)試驗期間之調查資料

依精準農耕之定義，施肥決策所需之生產力圖與肥力圖，應藉由遙測技術獲得較精準之空間資訊，但因研究計畫之各項遙測技術尚在發展當中。本文採用之肥力圖與產量圖仍以人工採樣方式獲得。其中產量圖則是從各小區內四個逢機點，以人工收割方式，各採樣 25 株，共 100 株，獲得小區產量資料。肥力圖係以網格方式於每個田區採 32 個土樣，而每小區之磷、鉀含量係爲小區之 4 個採樣點分析值之平均值(郭等，2001；劉等，2002)。

由於早期臺灣省肥力測定(林，1967)之土壤有效磷與有效鉀分析係採用 Bray No.1 與 Mehlich's No. 1 方法，因此決策系統係採用該方法之分析值作爲分級基準。但精準農耕研究計畫之土壤有效性磷、鉀均採用 Mehlich's No. 3 之分析方法。因此本文採用 Sibbesen and Sharpley (1997)與楊(1991)之報告，將目前土

壤有效磷與有效鉀分析方法之測值轉爲 Bray No.l 與 Mehlich's No. 1 之測值，轉換公式如下：

P(Bray No.1)=P(Mehlich's No.3)*1.06 --- (1)

P(Bray No.1)：以 Bray No.1 方法測定之土壤有效性磷濃度

P(Mehlich's No.3)：以 Mehlich's No.3 方法測定之土壤有效性磷濃度

K(Mehlich's No.1)=20.57+0.61*K(Mehlich's No.3) -- (2)

K(Mehlich's No.1)：以 Mehlich's No.1 方法測定之土壤有效性鉀濃度

K(Mehlich's No.3)：以 Mehlich's No.3 方法測定之土壤有效性鉀濃度

(3)施肥決策分析

田間作物生長之優劣取決於氣象因子、土壤特性、肥力與栽培管理等多項因子，而作物對養分之需求亦隨氣象與土壤因子而異。水稻施肥決策系統在施肥推薦上已考慮土壤特性與肥力因子，但在氣象方面，因台灣水稻僅分一期作與二期作，且各地區有其固定的栽種期，因此以期作生產力作爲氮肥需求之主要考量因子。期作生產力可藉由累積多期作的產量推估該地區之期作生產潛力。本試驗由於試驗期間各田區均以充足肥料量栽培，病蟲害亦不嚴重，故試驗田區之期作生產力，可藉由試驗期間各小區之最高產量構成。

依期作生產力圖及磷、鉀肥力圖，並連結土壤特性資料庫，施肥決策系統即可依其診斷基準，進行施肥推薦，產生施肥圖，供變率施肥機施肥參考。

三、結果與討論

<u>試驗田區各期作產量分佈</u>

爲探討農試所試驗田區之期作生產力，係將2000年一期作至2003年一期作之各小區產量圖，按施肥決策系統之生產力分爲五級，各年度各期作之產量圖如圖 3。各年度各期作產量之空間變異說明如下：

2000 年一期作前作爲旱作田區如 39、43、87 之玉米與 79 號西瓜田，由於試驗中並未考慮前作殘留肥料效果，各田區均施相同的肥料量，因此在 6 月中旬連續 10 天雨天後，這些田區均有不同程度之倒伏，造成收穫時之產量較其他試驗田區低。39 號與 82 號田區則因延至三月下旬才插秧亦造成減產。2000 年二期作 38、42 號田區因種植台農 71 號品種，又受象神颱風影響全面倒伏，因此平均產量只有 3.5 與 4.3 kg/ha。

2001 年一、二期作在 43、81、83、87 號田進行氮肥試驗(0、60、120、180 kg N/ha，撒施)，因此從一期作產量圖明顯看出前述田區與其他田區之差異及該田區不同肥料量處理對產量之影響。然而二期作因產量全面較低，因此該田區與其他田區之差異較小，但仍明顯看出 0 與 60 kg/ha 處理，因肥料供應不足所造成之低產。2001 年一、二期作另有病蟲害調查，係在 74 與 77 號有不防病處理，75 號田不防蟲處理，76 號不防病亦不防蟲處理，即上述田區不噴灑農藥。根據病蟲害調查結果顯示，上述田區並未發生嚴重的病蟲害，故有 74 號田之二期作產量甚至高於其他田區者之情形。然 75 號田則在 2000 年與 2001 年一、二期作均較低產，原判斷可能是該田區土層較淺(約<30cm)所致，但 2002 年一、二期作

與 2003 年一期作該田區之產量則與其他田區相近，足見土層深度並不是減產之主要限制因子。

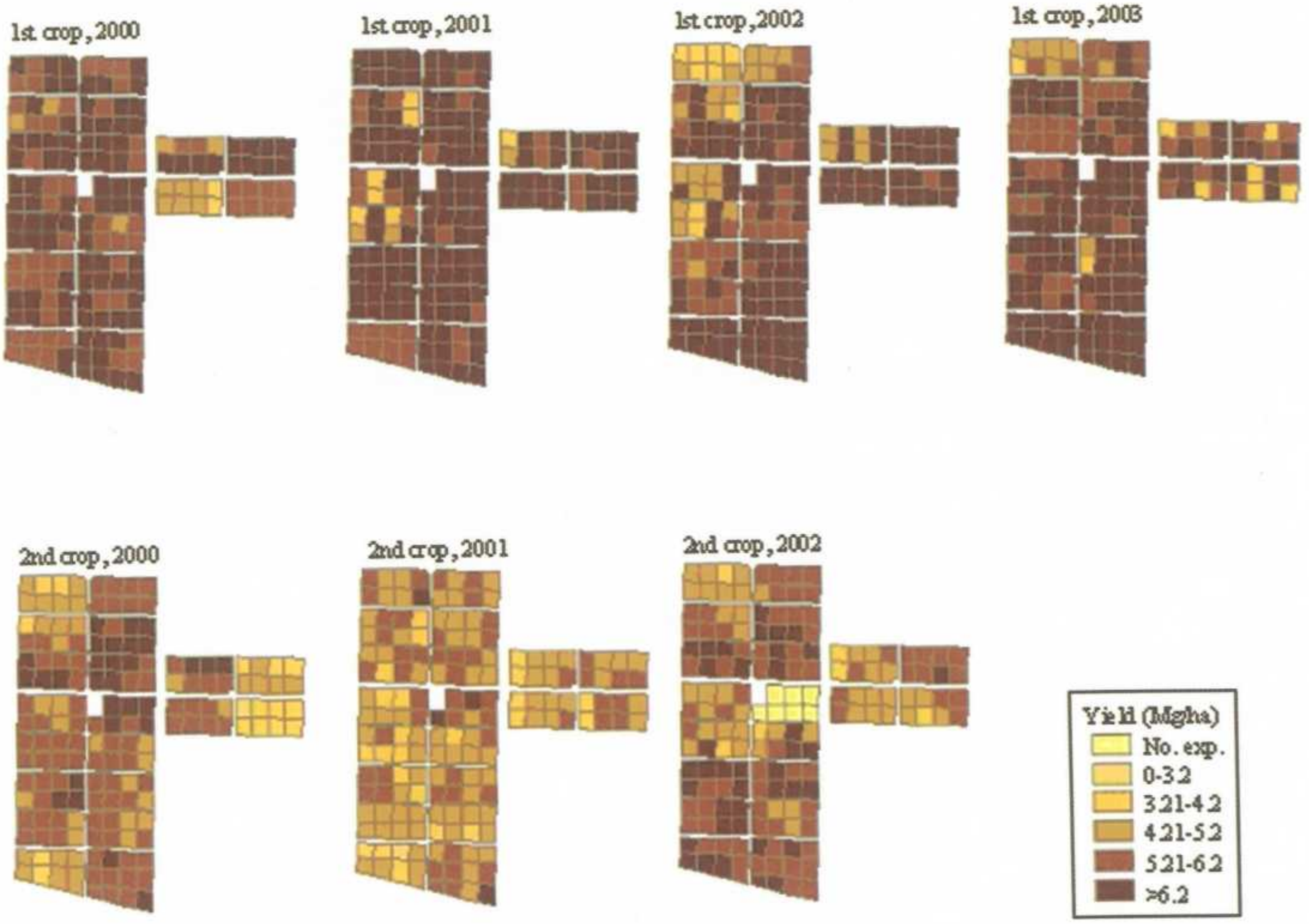


圖 3. 農業試驗所精準農耕試驗田區試驗期間各期作之產量分布圖。

2002 年一、二期作在 43、81、83、87 號田則以深層施肥機進行不同變量之氮肥試驗(0、45、90、135 kg N/ha)，但因施肥機還未能運作順暢，因此各處理施肥量大部分都低於試驗設計量，所以該田區之產量更低於其他田區，且各處理之產量並未完全顯著地呈現肥料處理等級之相對反應。另外爲配合植株氮營養在一期作時 88 號田有半量氮肥量處理(即僅施非特殊試驗田區之 50%氮肥量)與 89 號之不施氮肥處理，因此 88 號與 89 號田之產量低於一般田區。二期作亦出現相同情形，除了 88、89 號田之外，二期作另有 83 號田亦有多種變級的肥料處理，因此 83 號田之產量亦略低於其他田區產量。2002 年一、二期作亦有病蟲害調查，其中 76 號田爲不防蟲，77 號爲不防病處理。但因生長期間並未發生嚴重病蟲害，因此該田區之產量與其他田區相近。此外，爲配合精準農耕研究計畫展示會(於 2002 年 10 月 3 日舉辦)，82 號田二期作並未耕種。

2003 年一期作在 38 與 42 號田及 39 與 43 號田分別進行撒施與深施之肥料試驗(肥料處理等級與 2001 年及 2002 年者同)，以比較施

肥方式對產量之影響。此期作之肥料試驗田區之產量與其他田區亦有明顯之差異，各田區之產量分布亦呈現不同肥料處理對產量之影響，由撒施與深施不同施肥方式之肥料等級對產量之效應，則深施可明顯節省 20-30%肥料之效果甚明。88、89 號田半量肥料量與不施肥處理區，亦與 2001 年之結果相近，由產量可明顯看出肥料之效應。與 2002 年二期作相同，除了 88、89 號田之外，另有 86 號田亦有多種變級的肥料處理，因此 86 號田之產量亦略低於其他田區產量。

由於目前施肥機尚未能運作順暢，仍會有阻塞現象，因此施肥方式仍採用人工撒施方式，因此試驗田區產量之空間變異，除了上述不同品種，肥料處理或作業方式不同，造成空間產量之變異外，應主要是人工撒施肥料所造成的空間變異，且因撒施造成產量的變異遠較土壤肥力空間變異大，此可由田區各欉稻株在肥料供給充分處生產情形良好，甚至可達 10 Mg/ha 以上(郭，2001)，而肥料未達處生產情形即明顯下降可得証明。因此推測目前田區產量呈現之空間變異，主要是由於管理因子所致，而非肥力空間變異之效應。

但整體而言，農試所田區在一期作產量應可達一級生產力，而二期作各年度之生產力差異較大，但應可達二級之生產力，部分田區甚至可達一級生產力。台灣地區水稻二期作單位產量低於一期作者，已有許多報告論及。黃(1978)歸納減量原因主要爲氣象因素，其對稻株生長之影響可歸納如下：(1)二期作初期之高溫抑制稻株之生長，縮短營養生長期間，使一株分櫱數或穗數減少。(2)初期之高溫或中期的低日照量抑制稻株幼穗的生長，使一穗粒數減少。(3)二期作後期的不良氣候，諸如低日照量、低溫、季節風、颱風等，使結實率與千粒重降低，此以中北部地區較爲嚴重。(4)中南部第二期作兩期的低日照、高溫引起稻株之伸長及倒伏等。

試驗田區肥力空間變異

由於精準農耕研究計畫中有關遙測技術應用於肥力測定尚未成熟，因此仍暫以人工採樣的方式獲得肥力圖，每一田區之小區表土肥力係爲網格採樣之 4 個採樣點的肥力測定平均值。郭等(2002)亦應用地理統計方式推估肥力的空間變異。由於研究計畫之規劃，僅在 2000 年與 2001 年一期作前全面採樣，其他期作之採樣田區如圖 4、圖 5，其中肥力爲 0 者表示未採樣。雖然各小區爲 4 個採樣點之平均，但由於以土鑽採樣所取得的土壤樣品有限，在人工撒施肥料可能造成肥料在田間之分佈不均之情形下，同一小區之有效磷、鉀含量，並非隨期作而呈現某一趨勢的變化，特別是土壤較淺之小區，常因採土時混有石礫，造成測值變化較大，如圖四、五。在不同期作，少數田區出現磷、鉀含量列於中(4.7-11.3 μg/ml P by Mehlich's No. 3)或低級者(8-16 μg/ml K by Mehlich's No. 3)，大部分都是出現在土層深度較淺之小區。

試驗期間試驗田區之有效磷含量維持於極高(>28.3μg/ml P by Mehlich's No. 3) 與高等級(11.3-28.3μg/ml P by Mehlich's No. 3)，而鉀含量則維持於高(>48 μg/ml K by Mehlich's No. 3)與中(16-48 μg/ml K by Mehlich's No. 3)等級，故試驗田區是土壤磷、鉀之供給量仍屬充足。相較於民國 48-56 年之肥力測定的肥力資料，土壤有效性磷含量爲高級，土壤有效鉀含量爲中級，顯示試驗田區之磷、鉀含量均有累積之現象。

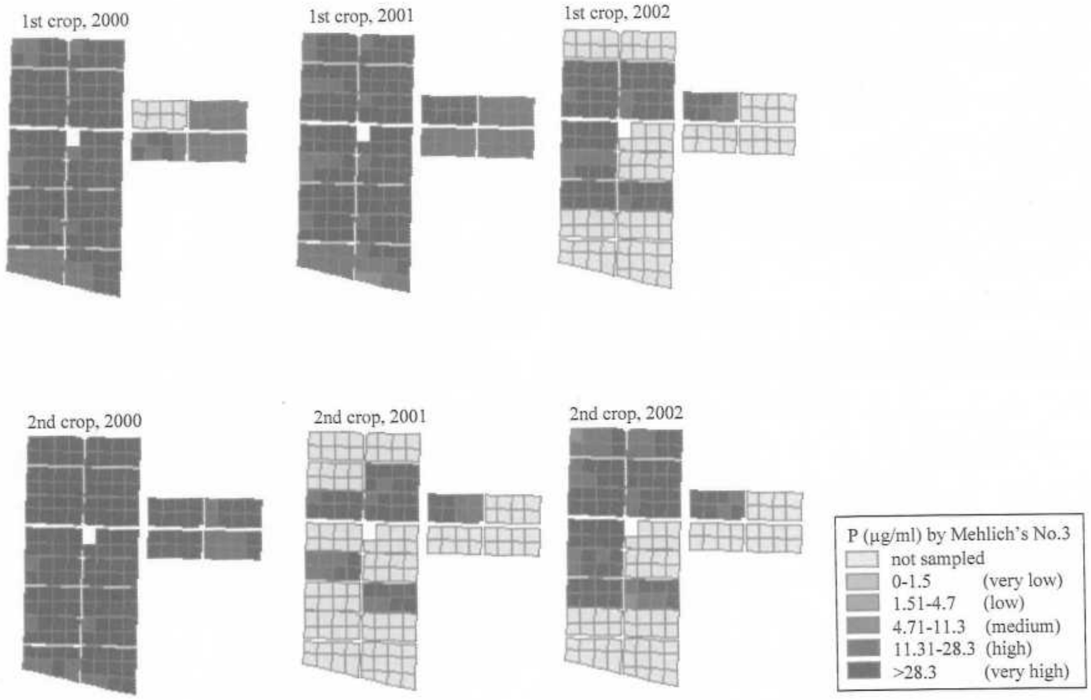


圖 4. 農業試驗所精準農耕試驗田區各期作種植前之表土磷含量分布圖。

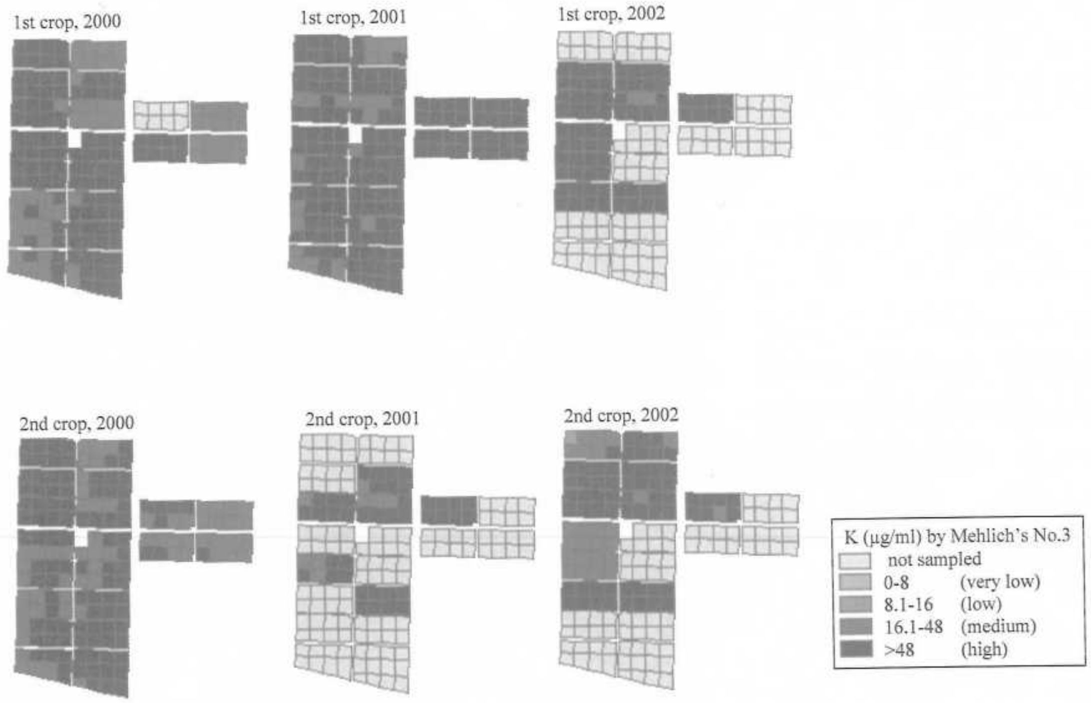


圖 5. 農業試驗所精準農耕試驗田區各期作種植前之表土鉀含量分布圖。

試驗田區施肥決策分析

精準農耕之施肥決策，需藉助遙測技術或相關技術提供空間的產量圖與肥力圖，作爲施肥推薦之診斷基本資料。雖然基於前述多期作的產量圖，可能因施肥方式所造成的產量空間變異大於土壤肥力空間變異之影響，但一、二期作因生長期間之氣候條件不同，仍有明顯的生產力差異。在肥力部分，則因採樣的限制，在相同的栽培耕作下，並未見逐年呈現某一趨勢的變化，但仍可提供區域長期肥力變遷之參考。

(1)期作生產力圖繪製

爲提供施決策系統之生產力圖(即生產潛量圖)，須累積多年的產量圖，本所在精準農耕研究計畫試驗期間，除了特殊的試驗設計外，肥料之供應均爲氮：磷酐：氧化鉀=130：69：60 kg/ha，就水稻之生長爲充足的養分供給，在試驗期間亦未發生嚴重之病蟲害，因此可整合多年的產量資料，提供試驗田之生產力圖。根據試驗田區之調查結果，一期作各小區應可全面列爲第一級生產力；二期作之生產潛力分佈圖，則 89、38、42 號田可以 2001 年之二期作產量爲準，81-88 與 39、43 號田可採用 2000 年二期作之產量，74-80 則採用 2002 年二期作之產量。

(2)磷、鉀肥力圖

土壤中磷、鉀含量雖隨作物耕作與肥培管理而有變化，但因其在土壤中之反應，不似氮素複雜，含量變化較緩和，因此一般建議二、三年即應檢測一次(陳等，2002b)，以掌握肥力狀態，提供合理的磷鉀施肥推薦，以減少肥料之浪費，並減輕環境之衝擊。由本試驗期間各期作之磷、鉀肥力狀態變化，亦顯示應可不必每一期作均檢測磷、鉀肥力。本次分析僅先採用採樣較完整之 2000 年二期作與 2000 年一期作之肥力圖進行施肥決策分析。

(3)施肥決策分析

依據目前農場之施肥管理，基肥係施用臺肥 39 號 300 kg/ha，第一次追肥施用臺肥 1 號 100 kg/ha，第二次追肥施用臺肥 1 號 200 kg/ha，全部試驗田共 10.83 ha，共需約 6500 kg 之肥料。若以前述繪製之一、二期作生產力圖，分別與 2001 年一期作與 2000 年二期作之肥力圖及連結土壤資料庫，以相同的肥料進行施肥推薦，則整個試驗田區一期作需 6200 kg 之肥料，二期作需 5600 kg 之肥料。相較於目前的施肥量，二期作約可節省 14%之施肥量。

由於試驗田區的磷、鉀含量均高於中級，因此在選擇施用複合肥料時，決策系統針對氮素需求進行推薦。故前述分析案例，若選擇施用單質肥料，則磷酐、氧化鉀施用量可分別再減施 70 與 50%左右。決策系統之穗肥推薦，主要依幼穗形成期時葉片氮素狀態而定，然而研究計畫中尚未提供整個施肥田區的幼穗形成期時葉片氮素狀態圖，故本文未進行分析。

目前水稻施肥決策系統之診斷基準係依據前人之肥料試驗結果，故施肥推薦乃依據我國現有之一、二期作耕作制度，若欲擴展於其他不同之栽種時期，則需藉助如水稻生長模式等之分析工具，此模式之適用性評估研究，亦在水稻精準農耕體系研究計畫進行中。

四、結語

本文係針對精準農耕研究計畫在農試所之試驗田區，進行施肥決策系統之案例分析。由於精準農耕研究試驗，未能提供使田區肥料均勻撒佈之技術，亦未能利用遙測技術提供更精準之施肥推薦，因此目前各期作試驗田區出現之空間產量變異，可能因人工撒施肥料所造成之肥力不均，導致產量之空間變異，較肥力或土壤之空間變異更關鍵。然而比較多年的產量圖，期作生產力之差異甚明，並可藉此可繪製試驗田區之期作生產力圖，以提供施肥決策之基本診斷資料。未來藉由遙測技術之開發，提供更精準之空間資訊，將相對可獲得更精準之施肥圖。

五、誌謝

本文研究承蒙行政院農委會 90 農科-4.1.1-農-C2(02)及 91 農科-5.1.3-農-C2(05)之計畫經費

支持。本所農場賴吉雄組長及楊清祥、陳烈夫、陳志昇、陳邦華、劉嘉仁，農化組王鐘和博士及江志峰、艾慶平、潘朝基、陳琳湖、林毓雯執行試驗田區之管理作業，並提供產量資料，農化組郭鴻裕研究員及劉禎祺、葉明智、朱戩良、劉滄棽等多位先生女士，提供試驗田區之肥力資料，作爲本文施肥決策分析之基本資料，特此致謝。

六、引用文獻

林家棻。1967。臺灣省農田肥力測定。臺灣省農業試驗所試驗報告第 28 號。臺灣省農業試驗所。

連深。1998。我們的水田需要減「肥」了！-- 水稻的合理化施肥技術。p.8-13。爲我們的土地量身減肥。合理化施肥推廣手冊(1)。行政院農業委員會、臺灣省政府農林廳。

連深。1999。稻田之肥培及土壤管理改進。p.379-388。台灣稻作發展史。臺灣省政府農林廳。

郭鴻裕、劉禎祺、譚增偉、朱戩良、劉滄棽、葉明智。2001。土壤資料庫之建立及土壤肥力空間變異。行政院農委會農業試驗所九十年度試驗研究計畫研究報告。(水稻精準農業(耕)體系之研究 II)。

郭鴻裕、劉禎祺、譚增偉、朱戩良、劉滄棽、葉明智。2002。應用土壤資料庫於水稻精準農耕土壤肥力分佈之探討。p.139-151。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。行政院農委會農業試驗所，臺中縣。

陳文德。2000。我國精準農業的發展方向與策略。p.8-13。水稻精準農業(耕)體系之研究研討會。楊純明、林俊義，主編。行政院農委會農業試驗所，臺中縣。

陳春泉、郭鴻裕。1991。台灣地區稻田生產力分級規範及調查。臺灣省農業試驗所特刊第 34 號。

陳琦玲、林毓雯、王鐘和、張瑞明、劉滄棽。2002a。水稻精準施肥決策系統初擬。p.167-178。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。行政院農委會農業試驗所，臺中縣。

陳琦玲、郭鴻裕、張愛華、劉滄棽。2002b。土壤資訊在合理化施肥上的應用。p.95-125。土壤資訊之應用學術研討會論文集。李達源主編。中華土壤肥料協會，臺北。

黃眞生。1978。台灣水稻二期作低產之原因。台灣二期作稻低產原因及其解決方法研討會專集。行政院國家科學委員會，臺北市。

楊光盛。1991。肥料推薦量系統模式建立研究。國立台灣大學農業化學研究所博士論文。

劉禎祺、郭鴻裕、譚增偉、朱戩良、劉滄棽、葉明智。2002。土壤資料庫之建立及土壤肥力空間變異。行政院農委會農業試驗所九十一年度試驗研究計畫研究報告。(水稻精準農業(耕)體系之研究 III)。

賴吉雄、楊清祥、陳邦華、陳志昇、劉嘉仁、陳烈夫、呂秀英。2001。精準農業水稻試驗農場之建立與運作。中華農業研究 50(3):77-87。

戴登燦、林月金。1992。台中區水稻施肥量與施肥方法之調查研究。I. 水稻施肥量與施肥次數。臺中區農業改良場研究彙報 35:33-40。

澀澤榮。2000。精密農法上的情報利用。農業與園藝 75(8):853-858。

Blackmore, S. 2000. Developing the principles of precision farming. http://www.cpf.kvl.dk

Lian, S. 1989. Fertility management of rice soils in R.O.C. on Taiwan. In FFTC Book Series No. 39.

Robert, P.C. 1997. Remote sensing: A potential powerful technique for precision agriculture. Land satellite information in the next decade II. December 4, 1997. Washinglon D.C.

Sibbesen, E. and A.N. Sharpley. 1997. Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils. p.156. Phosphorus Loss from Soil to Water. H. Tunney, O.T., Carton, P.C. Brookes and A.E. Johnston. (ed.) CAB international. UK.

Case Study of Fertilization Decision Support System for Precision Farming on Rice

Chi-Ling Chen* and Jui-Min Chang
Division of Agricultural Chemistry, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail:chiling@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Field experiments were conducted in the experimental farm of Taiwan Agricultural Research Institute to study a Fertilization Decision Support System for precision farming on rice in Taiwan. The experimental farm set up for the study was 10.83 ha and was divided into 163 grid subplots. The map of potential productivity of rice crop is constituted by using the maximum yields of grid subplots from the experiments, and serves as the key information for the nitrogen fertilizer recommendation. In the first crops, yields harvested from the subplots may reach the first level of productivity. In the second crops, yields from some subplots may reach the first level of productivity while some may reach only the second level of productivity. The concentration of available P in soil was maintained from high (11.3-28.3 μg P/ml, by Mehlich's No. 3) to very high level (>28.3μg P/ml, by Mehlich's No. 3) throughout the study. The concentration of available K in soil was maintained from medium (16-48 μg K/ml, by Mehlich's No. 3) to high level (>48 μg K/ml, by Mehlich's No. 3). According to the diagnosis and fertilization recommendation processed from the decision support system, it indicated that 14 % of total fertilizer used in the second crops may be cut out from the current application rate. In the future, when the précised space variability information can be provided from remote sensing, it can be expected to have a more accurate fertilization map for precision farming purpose.

Key words: Rice, Fertilization, Decision Support System.